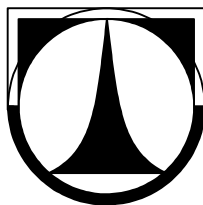


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



Disertační práce

**ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ POLYPROPYLENU
PLNĚNÉHO NANOJÍLEM**

2011

Ing. Daniel Hušek

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření

Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

ULTRAZVUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ POLYPROPYLENU
PLNĚNÉHO NANOJÍLEM

ULTRASONIC WELDING OF POLYPROPYLENE
WITH NANOCCLAY FILLER

Autor : Ing. Daniel Hušek

Školitel : prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Vedoucí katedry : prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 167

Počet obrázků: 117

Počet tabulek: 46

Počet příloh: 12

Anotace

Téma práce: **Ultrazvukové svařování polypropylenu plněného nanojílem**

Disertační práce se zabývá problematikou ultrazvukového svařování polypropylenu plněného nanojílem v blízkém poli na absolutní vzdálenost s využitím hydraulického brzdění pro zlepšení pevnosti svarového spoje. Hlavním cíl práce je zaměřen na zjištění vlivu procenta nanojílu v polypropylenové matrici na pevnost svarového spoje a na stupeň poškození svařence od svařovacího nástroje za různých podmínek svařování. Je hodnocen také vliv svařovací rychlosti na pevnost svaru a vliv procenta nanojílu na rozměry vstřikovaných zkušebních tělísek v oblasti svarových ploch při neměnných technologických parametrech vstřikování.

Klíčová slova: polypropylen, nanojíl, ultrazvukové svařování

Annotation

Theme of dissertation: **Ultrasonic welding of polypropylene with nanoclay filler**

The dissertation deals with an ultrasonic welding of polypropylene, which is filled with nanoclay, at a near field by an absolute distance with a hydraulic braking to improve a weld strength. The main aim of the dissertation focuses on an effect of a nanoclay concentration in a polypropylene matrix on the weld strength and a damage level of parts by a welding tool on different welding conditions. The dissertation investigates the effect of welding velocity on the weld strength and the effect of the nanoclay concentration on dimensions of moulded parts in a welding area under a condition of constant injection parameters.

Key words: polypropylene, nanoclay, ultrasonic welding

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací.

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my dissertation in full, in particular Section 60, School work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my dissertation for the internal purposes of TUL.

If I use my dissertation or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my dissertation to the full amount.

I compiled the dissertation on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultations.

Datum / Date: 30.6. 2011

Podpis / Signature:

Poděkování

Děkuji mému školiteli prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za podnětné připomínky a trpělivost. Dále děkuji týmu firmy Dukane, který zajišťoval technickou podporu pro svařovací zařízení. Děkuji také Ing. Vladimíru Duchanovi z firmy Unipetrol za poskytnutí granulátu polypropylenu. Poděkování patří rovněž již zesnulému panu Miroslavu Herčíkovi za vstřícný přístup při zhotovování vstřikovací formy.

Obsah:

1. Úvod	14
2. Plasty	16
2.1 Definice a druhy plastů	16
2.2 Kompozitní systémy	17
2.2.1 Typy nanokompozitních systémů	18
2.2.2 Montmorillonit	19
2.2.3 Způsoby přípravy polymer/jíl nanokompozitů	20
2.2.4 Charakterizace nanokompozitů typu polymer/jíl	23
2.2.5 Koncentráty nanojílových směsí pro polyolefiny	24
2.3 Faktory ovlivňující svařitelnost termoplastů ultrazvukem	25
3. Ultrazvukové svařování plastů	31
3.1 Ultrazvuk	31
3.2 Princip ultrazvukového svařování	32
3.3 Fáze ultrazvukového svařování	33
3.4 Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování	35
3.4 Ultrazvukové svařovací zařízení	36
3.4.1 Obecný popis	36
3.4.2 Základní systém ultrazvukového svařovacího zařízení	37
3.5 Svařovací parametry	39
3.6 Řízení procesu svařování	42
3.7 Analýza a řešení problémů ultrazvukového svařování	43
3.8 Tvar svarových ploch	47
3.8.1 Základní požadavky	47
3.8.2 Usměrnovač energie	48
3.8.3 Typy spojů	49
3.9 Tvar dílů	55
3.9.1 Svařování v blízkém nebo vzdáleném poli	55
3.9.2 Svařovací rovina	56
3.9.3 Další konstrukční kritéria	57
3.10 Ostatní techniky spojování pomocí ultrazvuku	59
3.11 Svařovací přípravek	62
4. Experimentální část	64
4.1 Popis experimentu	64
4.2 Vstřikovaný materiál	66
4.2.1 Plnivo	66
4.2.2 Materiál matrice	67
4.2.3 Stanovení koncentrace plniva v matrici	67

4.3. Návrh geometrie zkušebních tělísek	67
4.3.1 Tvar a velikost zkušebních tělísek	68
4.3.2 Usměrnovač energie	69
4.5 Vstřikování zkušebních tělísek	69
4.5.1 Vstřikovací forma	69
4.5.2 Technologické parametry vstřikování	71
4.6. Návrh svařovacího přípravku	72
4.7 Úprava zkušebních tělísek před svařováním	73
4.8 Stanovení tahových vlastností svařovaných materiálů	74
4.8.1 Zpracovaná naměřená data	76
4.8.2 Vyhodnocení	77
4.8.3 Dílčí diskuze výsledků	78
4.9 Měření tloušťky zkušebních tělísek	79
4.9.1 Měřicí pomůcky	79
4.9.2 Místa měření	80
4.9.3 Zpracované naměřené hodnoty	80
4.9.4 Vyhodnocení tloušťky tělísek pro nastavení výšky svařence	82
4.9.5 Vyhodnocení vlivu koncentrace nanojílů na tloušťku tělíska 1	83
4.9.6 Vyhodnocení vlivu koncentrace nanojílů na tloušťku tělíska 2	86
4.9.7 Dílčí závěr	89
4.10 Ultrazvukové svařovací zařízení	89
4.10.1 Popis	89
4.10.2 Stanovení metody a parametrů svařování	92
4.11 Výpočet výšky svařence	95
4.12 Popis zjišťování pevnosti svarového spoje	96
4.13 Popis experimentálních měření ultrazvukového svařování	97
4.13.1 Přehled experimentálních měření	99
4.13.2 Snímané veličiny během svařování	100
4.14. Měření vlivu změny mezery mezi svařenými tělisky na pevnost svaru	101
4.14.1 Výpočet d_{wft}	101
4.14.2 Zpracovaná naměřená data	103
4.14.3 Vyhodnocení	104
4.14.4 Dílčí závěr	108
4.15 Měření vlivu změny stupně brzdění	109
4.15.1 Zpracované naměřené hodnoty	109
4.15.2 Vyhodnocení	116
4.15.3 Dílčí závěr	119
4.16 Měření vlivu změny svařovacího tlaku	120
4.16.1 Zpracovaná naměřená data	120
4.16.2 Vyhodnocení	127

4.16.3 Dílčí závěr	130
4.17 Měření vlivu změny svařovací amplitudy	130
4.17.1 Zpracovaná naměřená data	131
4.17.2 Vyhodnocení	137
4.17.3 Dílčí závěr	142
4.18 Měření vlivu vyšší hodnoty K a p_w při shodné svařovací rychlosti	142
4.18.1 Zpracované naměřené hodnoty	142
4.18.2 Vyhodnocení	147
4.18.3 Dílčí závěr	149
4.19 Měření vlivu změny délky tělíska 1	149
4.19.1 Úprava svařovacího přípravku	150
4.19.2 Zpracované naměřené hodnoty	150
4.19.3 Vyhodnocení	151
4.19.4 Dílčí závěr	152
4.20 Měření vlivu velikosti podélné vůle uložení	152
4.20.1 Zpracované naměřené hodnoty	153
4.20.2 Vyhodnocení	154
4.20.3 Dílčí závěr	155
4.21 Vzhledové poškození svařovaných dílů	155
4.21.1 Vyhodnocení	156
4.21.2 Dílčí závěr	156
4.22 Přehled faktorů ovlivňujících pevnost svaru	157
5. Diskuze výsledků disertační práce	158
6. Závěr	162
7. Seznam použité literatury	164
8. Publikační činnost	166
9. Seznam příloh a přílohy	167

Seznam použitých zkratk a symbolů:

Označení	Rozměr	Význam
A	mm	výška usměrňovače energie
A_w	μm	svařovací amplituda (od vrcholu k vrcholu)
B	mm	šířka základny usměrňovače energie
A-D		Anderson-Darlingův test normality dat
AFM		Atomic Force Microscopy (mikroskopie atomárních sil)
AN		Anova - parametrický test
BT		Bartlettův test shody rozptylů
C	mm	mezera
b_1	mm	šířka zkušebního tělesa na délce L_0
D	mm	hloubka drážky
D_p	mm	aktivní průměr pístu pneumatického válce svářečky
DMA		Dynamic Mechanical Analysis (dynamická mechanická analýza)
d_h	mm	posun sonotrody během fáze dotlaku
d_{hf}	mm	absolutní poloha sonotrody na konci fáze dotlaku
d_s	mm	okamžitá měřená poloha sonotrody
d_{sc}	mm	absolutní poloha sonotrody dosedlé na kontrolní vložku
d_u	mm	absolutní poloha sonotrody při sepnutí ultrazvuku
d_w	mm	dráha vlastního svařování
d_{wf}	mm	absolutní poloha sonotrody na konci fáze vlastního svařování
d_{wft}	mm	teoretická absolutní poloha sonotrody na konci fáze vlastního svařování
d_{wft}'	mm	upravená teoretická absolutní poloha sonotrody na konci fáze vlastního svařování
e	mm	délka svaru
E_w	J	energie svařování
f	Hz	frekvence pohybu
F	N	měřená síla při tahové zkoušce
F_d	N	destrukční síla

F_h	N	síla F_{pv} pneuválce při tlaku p_h
F_{pv}	N	teoretická síla generovaná pneuválcem při pracovním tlaku p_p
F_s	N	okamžitá měřená síla na sonotrodě
F_u	N	síla pro sepnutí ultrazvuku
g	m/s^2	tíhové zrychlení
G	mm	šířka drážky
G_{pr}	kg	tíha pojezdu a použitého rezonátoru
G'	MPa	modul pružnosti ve smyku
h	mm	tloušťka zkušebního tělesa na délce L_0
H	mm	výška pera
HDPE		vysokomolekulární polyetylén
h_i	mm	výška kontrolní vložky
h_g	mm	mezera mezi díly po svařování při maximální naměřené tloušťce tělísek
hmot.		hmotnostní
j		index -vyjadřuje definované podmínky svařování I-III
K	1	stupeň brzdění
K-W		Kruskal-Wallisův neparametrický test mnohonásobného porovnávání
l_{td}	mm	délka dlouhého zkušebního tělíska
l_{tk}	mm	délka krátkého zkušebního tělíska 1
l_{tdmax}	mm	maximální naměřená délka dlouhého zkušebního tělíska
l_{tdmin}	mm	minimální naměřená délka dlouhého zkušebního tělíska
L	mm	počáteční vzdálenost čelistí při tahové zkoušce
LN		Leveneho test shody rozptylů
L_0	mm	počáteční měřená délka zkušebního tělesa
m	kg	hmotnost sonotrody a pojezdu
MMT		montmorillonit (jíl)
n	1	počet vzorků jednoho měření při svařování
OMMP		Obecná metoda mnohonásobného porovnávání (v programu Statistica)

p-hodnota	1	míra spolehlivosti statistických hypotéz
P_m	W	maximální okamžitý výkon sonotrody
PBTF		polybutyléntereftalát
PE		polyetylén
PEO		polyetylénoxid
p_{ds}	kPa	tlak pro pohyb sonotrody ke svařovaným dílům
p_h	kPa	tlak pro fázi dotlaku
p_p	kPa	pracovní tlak pneuválce svářečky
PP		polypropylen
PP-H		homopolymer polypropylenu
p_{us}	kPa	tlak pro návrat sonotrody do výchozí pozice
PVC		polyvinylchlorid
PVOH		polyvinylalkohol
PVPPyr		polyvinylpyrrolidon
p_w	kPa	svařovací tlak
q		index vyjadřující veličinu F_d , E_w , P_m
r_{qj}	1	korekční koeficient
r_{qI-III}	[1] 1	koeficienty veličiny q pro podmínky I, II, III
s		výběrová směrodatná odchylka naměřených hodnot x
S		výběrová směrodatná odchylka středních hodnot \bar{x}
SB		houževnatý polystyrén
SEM		scanning electron microscopy (skenovací elektronová mikroskopie)
S_p	mm^2	plocha pístu pneumatického válce svářečky
S_{sv}	mm^2	plocha svaru vycházející z půdorysného rozměru usměrňovače
S_0	mm^2	plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa
T	mm	šířka pera
T_d	mm	tloušťka svařované desky
$\tan \delta$	1	mechanický ztrátový faktor (útlum)
TEM		Transmission electron microscopy (transmisní elektronová mikroskopie)
T_g	$^{\circ}C$	teplota skelného přechodu plastu

t_h	s	doba dotlaku
T_m	°C	teplota tání plastu
T-metoda		Tukeyho metoda
t_w	s	čas vlastního svařování
$t_1 - t_{13}$	mm	tloušťka tělísek v místech měření 1 až 13
u	mm	korekce
UHMW-PE		ultra vysokemolekulární polyethylén
v	m/s	rychlost zvuku v materiálu
v_s	mm/s	okamžitá měřená rychlost sonotrody
v_w	mm/s	průměrná svařovací rychlost
W	mm	tloušťka stěny
x		naměřená hodnota
x_{max}		maximální hodnota z naměřených hodnot x
x_{min}		minimální hodnota z naměřených hodnot x
x_{qj}		veličina měřená při d_{wft}
x_{qj}'		veličina měřená při d_{wft}'
XRD		X-Ray Diffraction (rentgenografie)
\bar{x}		střední hodnota naměřených hodnot x
\bar{x}_{max}		maximální hodnota ze středních hodnot \bar{x}
\bar{x}_{min}		minimální hodnota ze středních hodnot \bar{x}
$\bar{x}_{t_{max1}}$		maximální střední hodnota tloušťky tělíska 1
$\bar{x}_{t_{max2}}$		maximální střední hodnota tloušťky tělíska 2
\bar{X}		střední hodnota středních hodnot \bar{x}
\bar{x}_{r_q}	1	průměrná hodnota korekčních koeficientů r_{qj} pro veličinu q
Δ		rozdíl $\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min}$ nebo $\bar{X}_{max} - \bar{X}_{min}$
ΔL_0	mm	prodloužení tělesa na délce L_0
ε	1	poměrné prodloužení
ε_B	1	poměrné prodloužení při přetržení
ε_M	1	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu
ε_y	1	poměrné prodloužení na mezi kluzu v tahu
λ	m	vlnová délka



σ	MPa	napětí v tahu
σ_{dsv}	MPa	tlakové napětí ve svaru při p_h
σ_M	MPa	napětí na mezi pevnosti v tahu
σ_y	MPa	napětí na mezi kluzu v tahu
•		značka shodnosti statisticky porovnávaných skupin
—		značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami

1. Úvod

Plasty jsou poměrně mladé materiály, které však již dokázaly výrazně ovlivnit vývoj lidstva a společnosti. V dnešní době si jen málokdo dovede představit život bez nich. V některých průmyslových odvětvích se staly nezastupitelným materiálem. Užívají se stále ve větším objemu a nalézají své využití v dalších oblastech.

Plasty se vyznačují nízkou měrnou hmotností, výbornými zpracovatelskými vlastnostmi, jsou elektrickými izolanty, mají výbornou korozní odolnost, tlumí rázy a chvění, atd. Jejich největšími nevýhodami jsou nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, kříp, ekologická zatížitelnost, apod. V současné době existuje na trhu několik tisíc různých druhů plastů. V technické praxi však výrazné uplatnění má jen několik desítek druhů plastů. Z celkového objemu světové produkce plastů představuje skoro 80% jen šest druhů plastů a 70% výroby jen tři druhy, kterými jsou polyolefiny, styrenové hmoty a polyvinylchlorid. Sortiment termoplastů se neustále zvětšuje výrobou stále nových a modifikací dosavadních polymerů. [1]

Technický rozvoj klade na plasty stále větší nároky a zlepšení vlastností plastů lze docílit přísadami, kterými mohou být změkčovadla, maziva, stabilizátory, retardéry hoření, barviva, nadouvadla, plniva, atd. Plniva ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti plastu. Implementací vhodného plniva do plastu lze vytvořit kompozitní materiál, který se vyznačuje synergickým efektem. Kompozity lze dělit dle tvaru disperze na vláknové, částicové a deskové s různou velikostí částic. V posledních několika letech se velkému zájmu těší nanomateriály, které lze uplatnit jako plniva do plastů. Rozptýlením částic o nanorozměrech v polymerní matici vznikají nanokompozity. Jako nanoplňivo lze použít kovové a jílové nanočástice nebo uhlíkové trubičky.

Spojování plastových dílů lze provést různými technologiemi, které poskytují spoje o různých vlastnostech. Mezi moderní technologie spojování plastů patří metoda ultrazvukového svařování. Její hlavní výhody spočívají v dosažení kvalitního svarového spoje v krátkém čase s vysokou čistotou pracovního prostředí a v možnosti svařovat násobně nebo kontinuálně rozdílné plasty. Ultrazvukové svařovací zařízení lze užít i pro zalisování kovových vložek, nýtování, tvarování, řezání, atd.

Pro disertační práci bylo vybráno téma ultrazvukového svařování polypropylenu

plněného nanojílem z důvodu atraktivity ultrazvukového svařování i nanomateriálů, častým uplatněním polypropylenu v technické praxi a nedostatku informací o vlivu nanojílu na proces ultrazvukového svařování. Volba polymerní matrice byla ovlivněna dostupným nanoplňivem pro polymery, kterým je nanojíl. Z důvodu značného útlumu ultrazvukových vibrací v polypropylenu se svařovalo v blízkém poli. Svařované díly byly navrženy o větší tloušťce pro jednoduché testování svarového spoje na běžných zkušebních zařízeních. Také se předpokládalo, že se na delší dráze vibrací více projeví vliv nanoplňiva obsaženého v matrici v poměrně nízké koncentraci oproti běžným plnivům. Protože nebyly dostupné svařovací parametry pro daný materiál, zvolenou geometrii a velikost svarových ploch, tak bylo provedeno svařování za různých podmínek. Tím byl navíc získán přehled o vlivu svařovacích parametrů na pevnost svaru. Hlavním cílem práce bylo zjištění vlivu nanojílového plniva v polypropylenové matrici na pevnost svarového spoje. Pro správné vyhodnocení bylo nutné zjistit vliv koncentrace plniva na pevnost plněného polypropylenu a také vliv na rozměry vstřikovaných zkušebních tělísek.

Předkládaná disertační práce se zabývá následujícími oblastmi:

- zjišťování vlivu koncentrace nanojílu v polypropylenu na pevnost výsledného nanokompozitu
- zjišťování vlivu koncentrace nanojílu v polypropylenu na rozměry vstřikovaných zkušebních tělísek
- zjišťování vlivu koncentrace nanojílu na pevnost svarového spoje při různých podmínkách svařování
- vliv koncentrace nanojílu a svařovacích parametrů na poškození svařovaných dílů
- doplňková měření – zjištění vlivu tvaru tělísek a vůle uložení tělísek ve svařovacím přípravku na pevnost svarového spoje

Doktorská práce vznikla na základě podpory studentského projektu studentské grantové soutěže, označené na Technické univerzitě v Liberci 2822.

2 Plasty

2.1 Definice a druhy plastů

Plasty jsou materiály, jejichž podstatou jsou makromolekulární látky, které lze tvářet, např. teplem nebo tlakem. Za makromolekulární látku se považuje taková látka, jejíž molekulová hmotnost je vyšší než 10000. Z chemického hlediska se jedná o organické sloučeniny. Makromolekulární látky se připravují polyreakcemi. Ve své podstatě to jsou jednoduché chemické reakce, které se však mohou mnohokrát opakovat. Polyreakce se mohou účastnit jen takové chemické sloučeniny, které mají v molekule alespoň dvě funkční skupiny schopné reagovat s dalšími molekulami. Opakování reakce je tedy umožněno vhodnou chemickou strukturou výchozích nízkomolekulárních sloučenin, které se označují monomer. Spojením mnoha monomerních jednotek vzniká polymer, což je látka s docela novými vlastnostmi. [2, s. 11]. Plasty lze členit do různých skupin podle různých kritérií. Pro praxi je nejdůležitější jejich dělení na základě jejich chování při zahřívání. Podle toho se dělí na termoplasty a reaktoplasty. [2, s. 15]

Dělení plastů na termoplasty a reaktoplasty

Termoplasty jsou polymery, které zahříváním přecházejí do plastického stavu a pak je možné je tvářet do požadovaného tvaru. Do pevného stavu přejdou ochlazením pod určitou teplotu, jež je pro daný druh plastu typická. Při zahřívání nastávají pouze změny fyzikální povahy, ale chemická struktura plastu se nemění. Proto lze proces plastikace a tuhnutí teoreticky opakovat do nekonečna. Ve skutečnosti však při zvýšené teplotě dochází za spolupůsobení vzdušného kyslíku k nežádoucí degradaci polymeru, což vede ke zhoršování jeho vlastností. [2, s. 15]

Reaktoplasty přicházejí ke zpracování jako poměrně nízkomolekulární sloučeniny, které v první fázi zahřívání rovněž měknou a je možné je tvářet, avšak tvářitelnost si udržují jen omezenou dobu, protože zahříváním se rozběhne polyreakce, zpravidla polykondenzace, která byla při výrobě polymeru v určité fázi přerušena a výsledkem je prostorově zesíťovaná struktura, která je pro reaktoplasty typická. Tento děj se nazývá vytvrzování a je nevratný. Vytvrzenou hmotu nelze

znovu ani roztavit ani rozpustit v rozpouštědlech. Jednotlivé úseky makromolekul jsou totiž tak hustě propojeny chemickými vazbami, že celý výrobek je možno považovat za jedinou ohromnou makromolekulu. Roztavení reaktoplastu není možné dosáhnout zahřátím ani na sebevyšší teplotu, neboť po překročení určité teploty nastává trhání chemických vazeb v řetězcích a hmota degraduje. [2, s. 15 - 16].

Dělení plastů podle nadmolekulární struktury

Dalším hlediskem při rozdělování plastů může být schopnost jejich makromolekul dosáhnout většího či menšího stupně uspořádanosti a vykazovat tak různou nadmolekulární strukturu. Podle toho se dělí na amorfní plasty, kde makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici, řetězce jsou v prostoru nepravidelně zkrouceny a propleteny a na krystalické plasty, jejichž makromolekuly vykazují značný stupeň uspořádanosti. Z jejich rentgenogramů lze určit tzv. stupeň krystalinity, který vyjadřuje relativní podíl uspořádaných oblastí uložených mezi oblastmi amorfními. Podle druhu plastu se pohybuje asi od 40 do 90%. Jak je zřejmé, nedosahuje uspořádanost makromolekul 100% a proto se plasty označují jako semikrystalické. Krystalickou strukturu mohou vykazovat pouze některé druhy termoplastů s příhodným tvarem makromolekul. Jiné termoplasty nejsou schopny krystalizace a jsou tedy amorfní. Stejně tak amorfní jsou všechny reaktoplasty, u kterých pravidelné uspořádání není možné s ohledem na zesíťovanou strukturu. [2, s. 16]

2.2 Kompozitní systémy

Kompozit lze definovat jako pevnou látku složenou nejméně ze dvou fází. Kompozit má vlastnosti, které nemá žádná z jeho složek a nedají se dosáhnout ani jejich sumací, což je označováno jako tzv. synergický (spolupracující) efekt. Kompozit musí obsahovat nejméně jednu spojitou fázi, která ho drží pohromadě a je nazývána matrice. Další nespojitá fáze, které by měly být v kompozitu rovnoměrně rozptýlené, se nazývají disperze. [3] U polymerních kompozitů je matricí polymer a disperzí plnivo. Disperze může být tvořena částicemi různého druhu a tvaru. Podle velikosti částic plniva lze kompozity rozlišit na makro, mikro a nanokompozity.

2.2.1 Typy nanokompozitních systémů

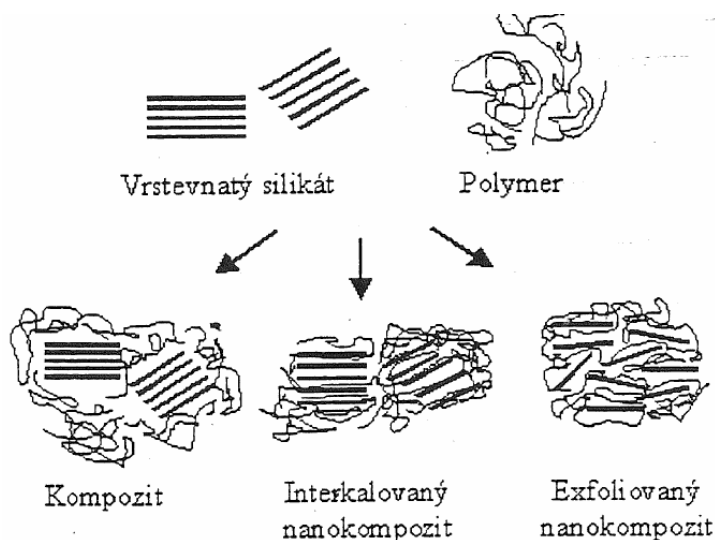
V praxi se rozlišují tři typy nanoplňiva, kde třídícím znakem je počet rozměrů dispergovaných nanočástic udávaných v nanometrech. Jestliže jsou tři rozměry v nanometrech, hovoříme o isomorfních globulárních částicích (např. nanočástice siliky). Pokud jsou dva rozměry udávány v nanometrech jedná se o fibrilární nanoplňiva (např. uhlíkové nanotrubičky). Poslední skupinu zastupují plošná nanoplňiva, kde je v nanometrech udáván pouze jeden rozměr. Plnivo představuje vrstvu silnou jeden až několik nanometrů a plošné rozměry dosahují stovky až tisíce nanometrů. Zástupci této skupiny jsou vrstevnaté jíly. V souvislosti s těmito třemi typy nanoplňiv se v průmyslových laboratořích vydělily tři směry výzkumu vedoucí k masovým aplikacím nanokompozitů:

- nanokompozity na bázi nanostrukturních siloxanů
- polymery plněné uhlíkovými nanotrubičkami
- nanokompozity na bázi vrstevnatých minerálů (přírodní i syntetické formy)

[4, s. 12]

Zvláště poslední jmenovaná skupina se těší velkému zájmu vědecké, ale i zpracovatelské komunity a to díky dostupnosti daného typu plniva a možnosti jeho uplatnění v komoditních polymerech. V současnosti nejintenzivněji zkoumaným jímlem s nanometrickou velikostí částic je montmorillonit (MMT). Jedná se o vrstevnatý aluminosilikát. Plošný rozměr jednotlivých vrstviček se pohybuje v jednotkách mikrometrů a tloušťka elementární vrstvy je přibližně 1 nanometr. Základní příčinou velkého zájmu o tento materiál v oblasti kompozitů je jeho tvarový faktor, který dosahuje hodnot 100-1000. Tyto hodnoty MMT určují cílové vlastnosti, které se u těchto nanokompozitů sledují, jako například modul pružnosti a pevnosti, bariérové vlastnosti, rozměrová stabilita, tepelná vodivost, odolnost proti hoření aj. V důsledku vysoké hydrofilicity vrstevnatého silikátu je nutné upravit jíl vhodnou organickou látkou tak, aby se stal jeho povrch hydrofobní a tudíž snášenlivý s polymerem. Užívá se speciálních postupů nazývaných interkalace nebo také organofilizace. Jedná se o proces, kdy interkalační látka proniká do vrstevnaté struktury montmorillonitu či jiného vrstevnatého jílu. Plnivo upravené tímto způsobem se dále mísí s polymerem či monomerem a následně dochází k jeho rozlískování až na elementární vrstvy. V tomto případě mluvíme o exfoliaci (delaminaci). Již malé množství vrstevnatého plniva stačí k modifikaci vlastností

polymeru, díky jeho obrovskému povrchu. V nanokompozitních systémech je obvykle 2 – 6% plniva ve srovnání s klasickými kompozitními systémy, kde se toto množství pohybuje mezi 20 – 40%. Hlavním problémem přípravy nanokompozitů je zajištění co nejvyššího stupně dispergace plniva v polymeru. Podle výsledné struktury lze kompozity typu polymer/jíl rozdělit do tří hlavních skupin (obr. 2.1) a to na kompozity konvenční, kde jíl hraje úlohu běžného plniva. Interkalované nanokompozity, v nichž je polymer pravidelně vmezeřen mezi vrstvy silikátového plniva. Poslední skupinu představují delaminované (exfoliované) nanokompozity. V ideálním případě je plnivo exfoliováno (rozvrstveno) až na elementární vrstvy o tloušťce 1 nm, které jsou dispergovány v polymerní matici. Zdá se, že poslední uvedený případ vede k největším změnám mechanických a fyzikálních vlastností materiálu. [4, s. 12]

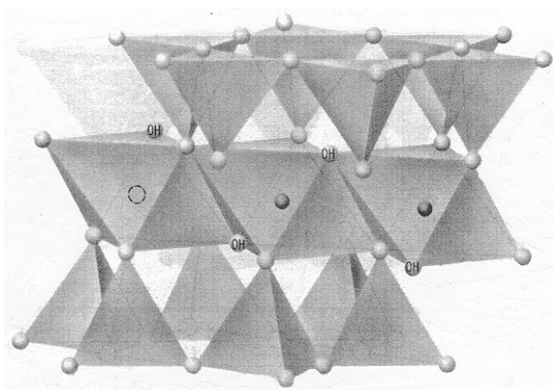


Obr 2.1: Schéma různých typů kompozitů polymer/jíl: a) konvenční kompozit; b) interkalovaný nanokompozit; c) delaminovaný (exfoliovaný) nanokompozit [4, s. 12]

2.2.2 Montmorillonit

Montmorillonit je součástí skupiny smektitů, která spadá do fylosilikátů, což jsou jílové minerály hojně přítomné nejen ve starších horninách, ale jsou základem recentních sedimentů a půd. Montmorillonit má dioktaedrickou síť (obr. 2.2) a jeho chemické složení vyjadřuje následující vzorec: $M_{0,5}Al_{1,5}Mg_{0,5}\square_{0,5}(Si_4O_{10})(OH)_2$, kde M označuje možné mezivrstevní kationty výměnného typ (K, Na, Ca) a \square je symbol

pro vakance nad rámec principu dioktaedrické sítě. Do tetraedrických pozic vstupuje jen minimum Al. V oktaedrických pozicích mohou vstupovat i Fe^{2+} nebo Fe^{3+} . Montmorillonit vzniká jako produkt zvětrávání bazaltových tufů, popelů a skel. Objevuje se i při zvětrávání hadců, pegmatitů nebo granitoidních hornin. Jeho barva je bílá, šedá nebo narůžovělá (obr. 2.3). [5]



Obr. 2.2: Struktura MMT [6]



Obr. 2.3: Montmorillonit [7]

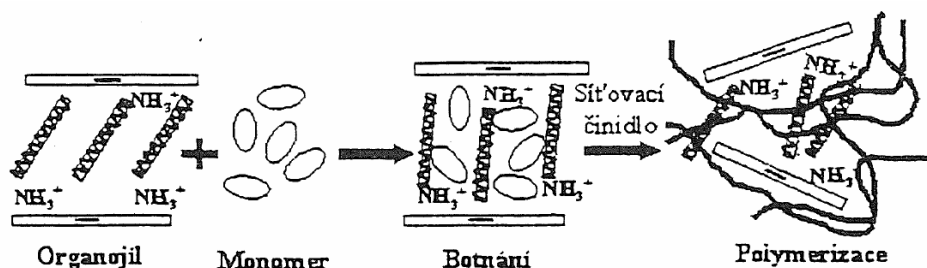
2.2.3 Způsoby přípravy polymer/jíl nanokompozitů

Obecně jsou známy tři hlavní způsoby přípravy nanokompozitů a to polymerace in-situ, roztoková polymerace a příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru. V současnosti věnuje akademická obec velkou pozornost poslední jmenované technice, což je dáno její jednoduchostí a možností využití stávajícího strojního vybavení při přípravě nanokompozitů. [4, s. 12]

Polymerace In-situ

Polymerace in-situ představuje běžný proces používaný pro přípravu nanokompozitů. V prvním kroku je organojíl nabobtnán v monomeru. Následuje přidavek síťovacího činidla u termosetů a samotná polymerizace (obr. 2.4). Polymerizace může být zahájena tepelným působením, radiačně, difuzí iniciátoru do mezivrstev nebo katalyzátorem zabudovaným v mezivrstvě plniva. Touto technikou lze vyrobit např. nanokompozity na bázi nenasyčených polyesterů, polyuretanů, polystyrenu. Touto technikou se již v laboratořích podařilo připravit interkalované/exfoliované typy nanokompozitů, jejichž základem je vysokomolekulární polyetylén (HDPE). Nanokompozitní systém lze vytvořit pouze v

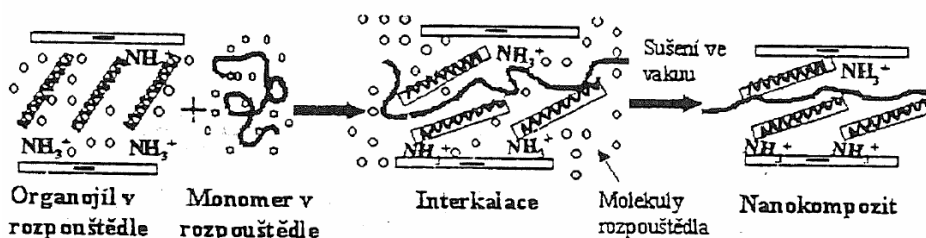
případě organofilizovaných jílu. Přírodní neupravené jíly a příprava mícháním taveniny v případě polyolefinů dává vzniknout pouze mikrokompozitním systémům. Touto cestou je možné připravit i UHMW-PE. Intenzivně se pracuje i na přípravě elastomerních nanokompozitů. [4, s.12-13]



Obr. 2.4: Polymerizace in-situ - polární molekuly monomeru difundují mezi vrstvy jílu [4, s. 12]

Roztoková polymerace

Postup je podobný polymeraci in-situ s tím rozdílem, že místo monomeru je použito rozpouštědlo vhodné pro daný typ polymeru. Organofil je dispergován v polárním rozpouštědle např. v toluenu, kde dochází k nabobtnání. Následně je v daném rozpouštědle rozpuštěn polymer. Oba roztoky se smísí a dochází k interkalaci mezi vrstvami organofilu. Posledním krokem je odstranění rozpouštědla (obr. 2.5). Vrstvy jílu se následně znovu seskupí a polymerní řetězce se zafixují v mezivrstvích. Vzniká tak mnohvrstevná struktura - interkalované nanokompozity. Roztokovou polymeraci je možné použít například pro přípravu nanokompozitů na bázi polyetylenu nebo polyimidu. [4, s. 13]

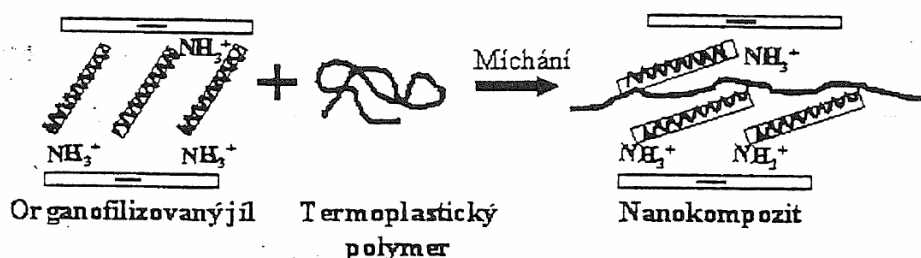


Obr. 2.5: Roztoková polymerace - šedé tečky představují molekuly rozpouštědla [4, s. 13]

Tato technika se uplatňuje i u ve vodě rozpustných polymerů např. polyvinylalkohol (PVOH), polyetylénoxid (PEO), polyvinylpyrrolidon (PVPPyr). Silná interakce mezi vodným roztokem makromolekul a silikátovými vrstvami často spouští proces znovuseskupení delaminovaného silikátu. To znamená, že výsledkem je interkalovaný nanokompozit. Mohou zde však společně koexistovat i interkalované a exfoliované struktury. [4, s. 13]

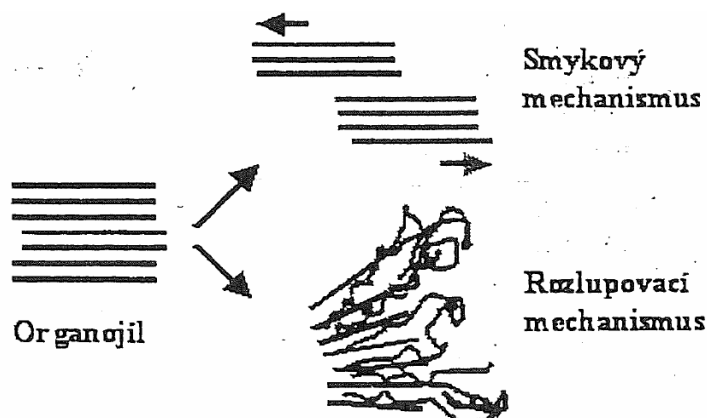
Mícháním taveniny polymeru

Podstata tohoto způsobu přípravy spočívá v míchání roztaveného termoplastu s upraveným organojílem a následné chlazení směsi (obr. 2.6). [4, s. 13]



Obr. 2.6: Příprava nanokompozitů mícháním taveniny polymeru [4, s. 13]

Skutečnost, že polymerní řetězce se mohou při transportu hmoty vmezeřit mezi vrstvy organojílu je překvapující, neboť gyrační poloměr polymerního klubka je mnohem větší než mezivrstevní vzdálenost jednotlivých vrstev organojílu. Obecně je výsledek polymerní interkalace určen souhrou entropických a entalpických faktorů. Ve skutečnosti má uvěznění polymerního řetězce mezi silikátové vrstvy na svědomí snížení celkové entropie makromolekulárních řetězců, tato ztráta je kompenzována rostoucí konformační volností vázaných řetězců interkalátu na anorganické vrstvě plniva v důsledku rostoucí mezirovinné vzdálenosti. Hnací silou procesu je tedy entalpický příspěvek interakce mezi polymerem a organicky modifikovaným jílem. Tímto způsobem lze připravit jak interkalované tak exfoliované nanokompozity. V případě neúplné exfoliace se v systému mohou objevovat interkalované i exfoliované struktury. Při přípravě nanokompozitů kompondací taveniny se uplatňují disperzní mechanismy. Jedná se o smykový a rozlupovací (difuzní) mechanismus (obr. 2.7). [4, s. 13]



Obr. 2.7: Mechanismus dispergace [4, s. 14]

První z nich je ovlivňován tvarem komponentačního zařízení, je nutné vysoké smykové napětí. Příčinou druhého mechanismu je difúze polymerních řetězců do mezivrstvy. Efektivita tohoto mechanismu závisí na kompatibilitě interkalované organické vrstvy s pronikajícími molekulami polymeru a na struktuře interkalátu. Zdá se, že bez dostatečně silného účinku rozlupovacího mechanismu se uplatňuje smykový mechanismus pouze částečně. [4, s. 13]

2.2.4 Charakterizace nanokompozitů typu polymer/jíl

Pro charakterizaci výsledných nanokompozitů se používá dvou hlavních metod a to rentgenografie a elektronové mikroskopie. Tyto metody nám mohou podat informaci o struktuře výsledného materiálu. Informují nás tedy o stupni delaminace (exfoliaci) nanokompozitů. Pro hodnocení výsledných vlastností nanokompozitů se používají zkoušky běžné pro klasické polymerní systémy s ohledem na jejich výsledné použití. [4, s. 14]

Rentgenografie (XRD)

Rentgenová difrakce je vhodná technika jak pro určení mezivrstevní vzdálenosti organofilizovaných jíků, tak pro charakterizaci výsledných nanokompozitů. Je to metoda vyznačující se relativně snadnou přípravou vzorků a výsledky mohou být známy během několika hodin. Velmi malé množství plniva v polymeru a měření při malých úhlech představuje dva hlavní problémy XRD analýzy. Tato technika má tedy své limity a může vést ke špatným závěrům. Z tohoto důvodu se kombinuje s

elektronovou mikroskopií. Míru uspořádanosti systému charakterizuje počet a ostrost difrakčních maxim. Čím jsou vyšší, tím je struktura uspořádanější a naopak s klesající ostroostí roste stupeň neuspořádanosti systému. Nepřítomnost difrakčních maxim u nanokompozitů tedy indikuje vysoký stupeň exfoliace elementárních lamel v polymerní matrici. Tímto rentgenografie poskytuje cenné údaje týkající se úspěšnosti zpracovatelského procesu a struktury výsledného nanokompozitu.

[4, s. 14]

Mikroskopie

Mikroskopie je technikou zabývající se studiem struktury materiálu, tato technika je vhodná pro ověření výsledků vyplývajících z XRD analýzy nanokompozitů. V případě nanokompozitních systémů lze ke studiu jejich struktury použít všech tří metod elektronové mikroskopie, tj. skenovací elektronová mikroskopie (SEM), transmisní elektronová mikroskopie (TEM) a mikroskopie atomárních sil (AFM). Jako nejvhodnější se jeví TEM, která je však náročná na přípravu preparátů.

[4, s. 14]

Dynamická mechanická analýza (DMA)

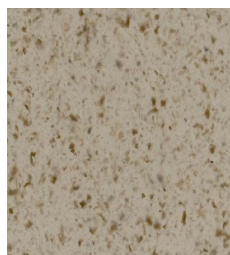
Jako velmi účinná metoda hodnocení nanokompozitů se jeví z doposud provedených zkoušek s PVC nanokompozitními systémy dynamická mechanická analýza. Z několikanásobného nárůstu modulů lze vyvodit exfoliaci plniva v polymerní matrici. Výsledky DMA jsou ve shodě s rentgenografickým a mikroskopickým pozorováním. V případě materiálů u nichž k interkalaci či deleminaci nedošlo se tento nárůst neobjevuje. DMA tedy může charakterizovat polymerní materiály závislostí modulu a útlumu (ztrátového úhlu) na teplotě a případně na čase. [4, s. 14]

2.2.5 Koncentráty nanojílových směsí pro polyolefiny

Koncentráty nanojílových směsí jsou vysoce výkonové materiály, které nahrazují tradiční minerální nebo skelná plniva a retardanty hoření v mnoha typech polymerních směsí. Obsah nanojílu se pohybuje v koncentrátu v desítkách procent, konkrétně 40% u produktů firmy Polyone. Koncentráty pomáhají začlenit a rozptýlit

jíl k vytvoření nanokompozitní struktury během finálního procesu. Užití koncentrátů pomáhá překonat dřívější potíže při začleňování nanojílu přímo do směsi. Koncentráty jsou produkty, které mohou být užity v mnoha procesech bez ústupků v technologických parametrech. Koncentráty zlepšují fyzikální vlastnosti polymeru. Mohou redukovat množství aditiv potřebných k dosažení požadovaných výhod a tak redukovat v porovnání s tradičními materiály celkovou hmotnost. [8]

Koncentráty pro polypropylen a polyetylén jsou k dispozici pro užití v mnoha technologiích (vstřikování, vytlačování, vyfukování, atd.). Běžně se do matrice přidává 10 až 20% koncentrátu, která tedy obsahuje 4 až 8% nanojílu. Koncentráty přinášejí výhody fyzikální, estetické a procesní. U polyolefinů zvyšují pevnost, stálost, rozměrovou stabilitu, teplotní odolnost, vzhledové vlastnosti, výrazně nezvyšují jejich hmotnost a snižují propustnost plynů a hořlavost. Koncentráty jsou snadno použitelné, jsou neabrazivní, nevyžadují sušení a lze je užít v běžných procesech na běžných zařízeních. Významné uplatnění nacházejí v automobilovém průmyslu, obalovém průmyslu, ale také u běžných výrobků užívaných v domácnosti i ve venkovním prostředí. Efektivní exfoliace a rozmístění nanojílových destiček je základem k maximálnímu výkonu materiálů založených na nanojílu. Na obr. 2.8 je zobrazena nekompletní a efektivní exfoliace nanojílových destiček v polymerní matrici. [9]



nekompletní exfoliace



vynikající exfoliace

Obr. 2.8: Ukázka exfoliace v polymerní matrici [9]

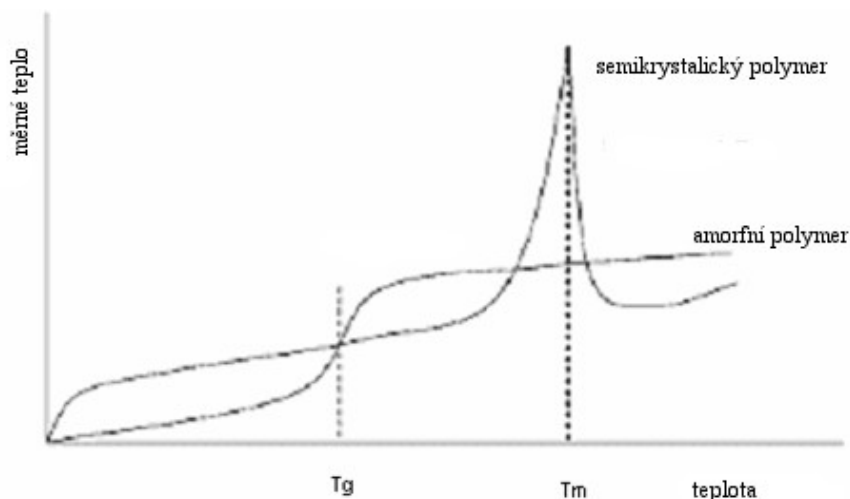
2.3 Faktory ovlivňující svařitelnost termoplastů ultrazvukem

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují svařitelnost termoplastů ultrazvukem, jako například nadmolekulární struktura plastu, jeho chemické složení, plniva, aditiva, atd.

Nadmolekulární struktura

Amorfní plasty nemají definovaný bod tání. Při zahřívání postupně měknou jak přecházejí z pevného stavu přes oblast zesklennění, která je charakterizována teplotou skelného přechodu T_g , do stavu kaučukovitého a následně do stavu viskózního toku. Tuhnutí probíhá rovněž postupně. [10, s. 9]

Semikrystalické plasty mají ostrý bod tání. Aby mohlo nastat jejich tání, je potřeba velké množství energie pro rozrušení krystalické struktury. Semikrystalické plasty jsou tuhé dokud není dosažena teplota tání a po jejím dosažení se stávají okamžitě tekutými. Molekulám je v tomto stavu umožněno téci. Rychlé tuhnutí nastává právě kvůli náhlé krystalizaci molekul. Obrázek 2.9 ilustruje rozdíly při tavení amorfních a semikrystalických plastů. [11, s. 18]



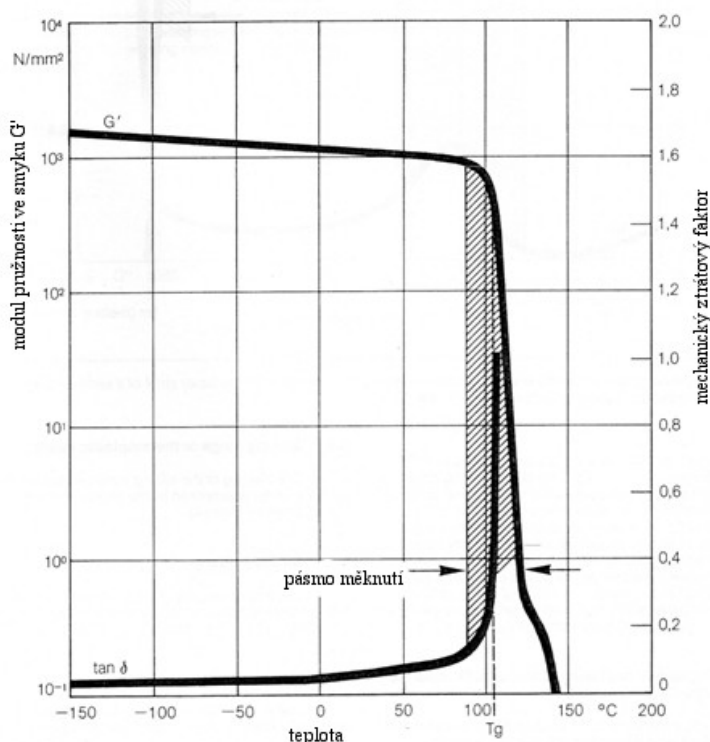
Obr. 2.9: Měrné teplo amorfního a semikrystalického polymeru při teplotě skelného přechodu (T_g) a teplotě tání (T_m) [11, s. 18]

Vyšší hodnota vyžadované energie pro tání semikrystalických plastů je jedním z důvodů větší obtížnosti jejich svařování oproti amorfním plastům. Dalším důvodem je nižší schopnost vést mechanickou energii ve formě vibrací. Semikrystalické plasty obsahují oblasti s uspořádanými molekulami, které pohlcují vibrační energii, což ztěžuje přenos vibrací z místa kontaktu sonotrody na díle skrz plastový díl do místa svaru. U amorfních materiálů jejich nahodilé uspořádání molekul dovoluje vést snadno vibrační energii s malým útlumem. [10, s. 10]

Příznivé svařovací vlastnosti mohou být očekávány u materiálu s vysokým modulem pružnosti ve smyku G' , který je konstantní do teploty skelného přechodu.

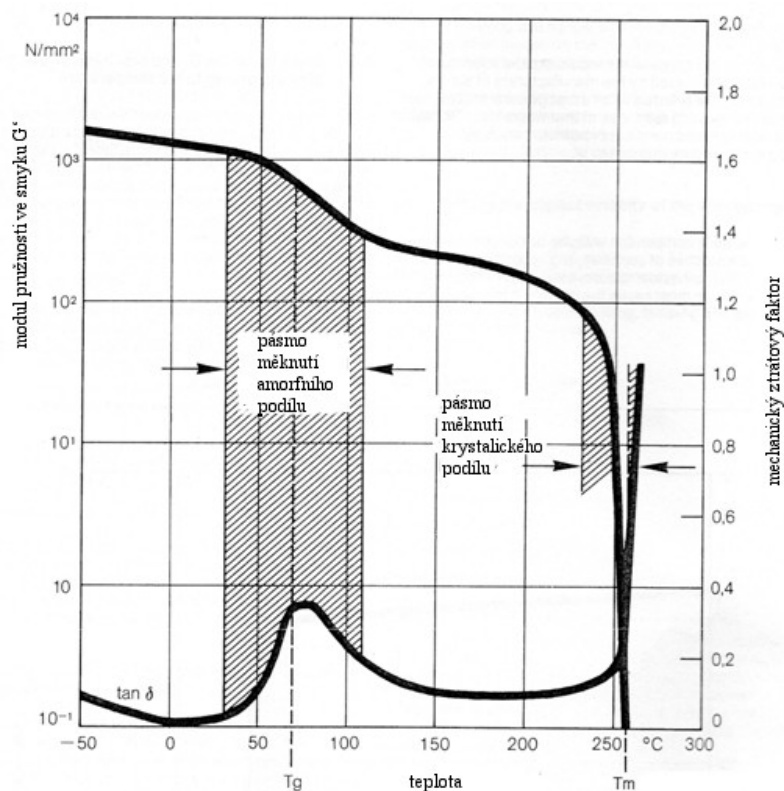
Současně mechanický ztrátový faktor $\tan \delta$ (útlum) by měl být nízký až do teploty skelného přechodu a být konstantní jak je to jen možné. Tvrdé amorfnní plasty mají tyto příznivé vlastnosti při pokojové teplotě (obr. 2.10). Zvukové vlny jsou dopraveny do styčných ploch spoje bez velké ztráty a přeměněny na teplo. Většina výztužných materiálů zvyšuje tuhost, což zvyšuje i modul pružnosti ve smyku. Modul pružnosti ve smyku je rovněž ovlivněn v případě nevyztužených plastů s obsahem vlhkosti, semikrystalickou strukturou, orientací krystalů a přítomností vnitřního napětí. [12, s. 13]

Výrazný pokles křivky modulu pružnosti ve smyku nad teplotou skelného přechodu nebo nad zónou tání znamená zvýšení mechanického ztrátového faktoru, což způsobuje výrazný útlum zvukových vln na cestě ke styčným svarovým plochám (obr. 2.11). Obecně jsou ztráty energie větší v případě semikrystalických plastů než v případě tvrdých amorfnních plastů. Při svařování identického dílu ze semikrystalických plastů je vyžadován většinou větší výkon nebo delší čas svařování a větší amplituda oproti dílu z amorfnních plastů. Obecně je vhodnější kratší svařovací čas. [12, s. 14]



Obr. 2.10: Teplotní chování smykového modulu G' a mechanického ztrátového faktoru $\tan \delta$ u amorfnního termoplastu (SB)

T_g - teplota skelného přechodu [12, s. 13]



Obr. 2.11: Teplotní chování smykového modulu G' a mechanického ztrátového faktoru $\tan \delta$ u semikrystalického termoplastu (PBTP)

T_m - teplota tání; T_g - teplota skelného přechodu [12, s. 14]

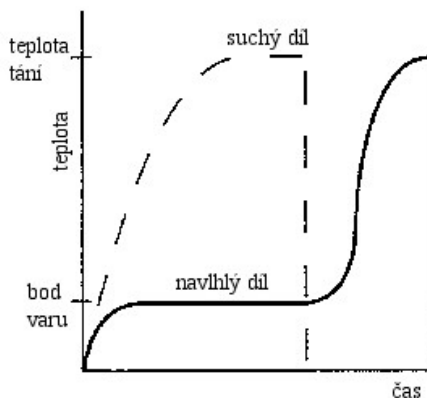
Chemická kompatibilita plastů

Pro spojení dvou dílů z termoplastu je nezbytné, aby materiály byly chemicky kompatibilní pro vytvoření molekulární vazby. Dobrým příkladem by byla snaha svařit polyetylén a polypropylen. Oba jsou semikrystalické plasty, mají podobný vzhled i mnoho fyzikálních vlastností, nicméně nejsou chemicky kompatibilní a není je možno vzájemně svařovat. Dokonce i když jsou svařovány termoplasty se stejnými chemickými vlastnostmi, měl by se užít materiál od stejného výrobce a stejné jakosti k vyvarování se nepředvídatelných výsledků svařování. [10, s. 10]

Navlhavost

Navlhavost je sklon materiálu pohltnout vlhkost. Plasty jako například polyamidy, polykarbonáty, polysulfidy jsou hydrofobické, takže pohlcují a zadržují vlhkost ze vzduchu. Navlhavost negativně ovlivňuje svařitelnost, protože při svařování se voda obsažená v plastu začne odpařovat a vařit při dosažení teploty varu (obr. 2.12). To má za následek pórovitý svar, obtížné dosažení těsnosti spoje, nevzhlednost spoje a

vliv na pevnost spoje. Navlhavé díly by měly být svařovány okamžitě po vystříknutí. Pokud to není možné musí být před svařením skladovány, nejlépe v utěsněných polyetylenových pytích s vysoušecí látkou. Díly skladované bez ochrany proti navlhání se před svařováním vysušují. [10, s. 11]



Obr. 2.12: Efekt navlhavosti na svařovací čas [10, s. 11]

Plniva

Plniva jako skelná vlákna, talek, uhlíková vlákna a uhličitan vápenatý jsou přidávány do plastů pro změnu jejich fyzikálních vlastností. Skleněné plnivo může být přidáno pro zlepšení rozměrové stability nebo pevnosti plastu. Běžná minerální plniva jako sklo nebo talek mohou zlepšit svařitelnost termoplastů, protože zlepšují schopnost plastů vést vibrační energii, zvláště u semikrystalických plastů. Vliv množství konkrétního plniva na svařitelnost konkrétního plastu musí být individuálně zjištěn. Určitý přímý poměr mezi obsahem plniva a zlepšením svařitelnosti existuje jenom v určitém intervalu obsahu plniva. Při překročení 10% až 20% obsahu plniva se mohou objevit problémy. Pokud by byl obsah plniva 30 hmotnostních procent, tak skutečný obsah plniva ve spoji by mohl být mnohem větší od akumulace plniva ve stykových plochách svaru. Při kritické hodnotě akumulace již není dostatek plastu k vytvoření akceptovatelného svaru. Pokud obsah plniva ve spoji překročí 40%, pak je materiál spíše nesvařitelný než svařitelný. Obsah plniva nad 20% může způsobit nadměrné opotřebení sonotrody i svařovacího přípravku od přítomnosti částic na povrchu plastového dílu, což lze zmírnit sonotrodami z tepelně zpracované oceli nebo z titanu povlakovaného karbidy. Rovněž je nutné počítat s vyšším výkonovým požadavkem na svařovací zařízení pro vytvoření dostatečného množství tepla ve spoji. [10, s. 12, 13]

Aditiva

Mezi aditiva se řadí:

➤ Separální látky

Separální látky jsou obvykle nastříkávány přímo na stěny dutiny formy a slouží k snadnějšímu vyjímání výstřiků snížením tření mezi dílem a stěnami formy. Bohužel tyto látky na povrchu vstřikovaných dílů snižují tření mezi stykovými svarovými plochami při svařování. Protože ultrazvukové spojování závisí na tření ploch, má užití separální látky negativní vliv na svařitelnost. Chemická kontaminace plastu separální látkou může i zabránit vytvoření svaru. Některé separální látky mohou být z dílů odstraněny před svařováním čištěním pomocí vhodných rozpouštědel. Pokud je nutné užít separální látky, tak jsou preferovány takové, které dovolují lakování a tisk, protože nejméně zasahují do ultrazvukového svařování a často se ani nemusí před svařováním odstraňovat. Pokud je to možné, tak by neměl být používán stearan zinečnatý, hlinitý, fluorouhlíkové sloučeniny a silikony. [10, s. 11]

➤ Mazadla

Mazadla jako vosky, stearan zinečnatý a hlinitý, kyselina stearová a mastné estery jsou přidávány do plastu pro zlepšení tokových vlastností a zlepšení zpracovatelnosti. Protože vnitřní mazadla nemohou být odstraněna a budou redukovat koeficient tření ve stykových plochách svařovaných dílů, mohou také celý proces spojování ultrazvukem znemožnit. [10, s. 12]

➤ Změkčovadla

Změkčovadla jsou užívána ke zvýšení ohebnosti a měkkosti materiálu. Mají tendenci migrovat nebo se vracet po nějaké době do svaru, což má za následek snížení pevnosti spoje. [10, s. 12]

➤ Retardanty hoření

Retardanty hoření jsou užívány ke změně hořlavých vlastností plastů. Retardanty jako antimony, bór, halogeny, dusík a fosfor jsou přidávány do plastů k udržení teploty pod teplotou hoření nebo k prevenci chemické reakce mezi plastem a kyslíkem či dalšími hoření podporujícími plyny. Retardanty

hoření mohou přímo ovlivnit svařitelnost termoplastů redukcí pevnosti svaru. Často je vyžadováno výkonné zařízení operující s vyššími amplitudami než jsou běžné, aby byly díly převařeny k dosažení adekvátní pevnosti. [10, s. 13]

➤ Barviva

Tekutá nebo suchá barviva nebo pigmenty mají velice malý efekt na svařitelnost plastů pokud obsah barviv v plastu není neobyčejně vysoký. Bílé a černé díly často vyžadují více pigmentů než další barvy, což může způsobit problémy. Rozdílné barvy na stejném díle mohou vyžadovat rozdílné nastavení parametrů. [10, s. 13]

Regenerát

Regenerát je termín daný plastu, který byl zrecyklován a přidán do nového plastu. Ultrazvukové svařování je jednou z mála procesních metod dovolujících užití regenerátu, protože vlastně není přidána do plastu žádná cizí substance. A to za předpokladu, že užitý obsah regenerátu není velký a plast nebyl degradován a kontaminován. Nicméně pro nejlepší výsledky svařování je doporučeno držet obsah regenerátu na co nejnižší hodnotě. [10, s. 13]

Jakost plastu

Jakost plastu může mít významný vliv na svařitelnost. Jakost je důležitá, protože rozdílné jakosti toho samého materiálu mohou mít velice rozdílné teploty tavení, což vede ke slabým svarům nebo zjevné nekompatibilitě. Kdykoli je to možné, tak by měly být užity při ultrazvukovém spojování materiály ve shodné kvalitě. [10, s. 13]

3. Ultrazvukové svařování plastů

3.1 Ultrazvuk

Rozsah mechanických vibrací, které jsou slyšitelné lidským uchem leží mezi 16 Hz a 16000 Hz. Neslyšitelné frekvence ležící pod 16 Hz jsou nazývány jako infrazvuk a frekvence mezi 16000 Hz až 10^{10} Hz jako ultrazvuk. Frekvence nad

10^{10} Hz jsou označovány jako nadzvukové. Ultrazvukové vibrace jsou užívány v širokém rozsahu aplikací jako je například čištění, svařování kovů a plastů, obrábění, tváření kovů, pájení, testování materiálů, určování polohy, diagnostika, terapie, přenos signálu, atd. Výsledkem nárůstu užívání termoplastů došlo k vývoji ultrazvukových technik spojování, které se tak staly významnými procesy v technologiích spojování. Zvláště ultrazvukové svařování plastů a nýtování se široce užívají v oblastech elektrických zařízení, komponentů a motorů aut a textilního průmyslu. Podle oblasti aplikace je používáno ultrazvukového svařovacího zařízení s frekvencí mezi 20 kHz až 50 kHz. Komerční elektrostriční a magnetostrickní měniče téměř vždy vibrují podélně, takže plocha oscilátoru emitující zvuk vibruje sinusoidně kolem své klidové pozice. Obrázek 3.1 ukazuje podélnou vlnu, kde se směr šíření shoduje se směrem vibrací. Vzdálenost mezi dvěma shodnými oscilačními stavy je vyjádřena vlnovou délkou λ , kterou lze vypočítat ze vzorce (3.1). [12, s. 6]

$$\lambda = v/f \quad (3.1)$$

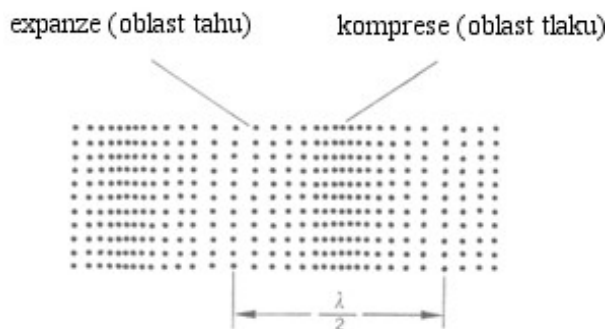
kde je:

λ ... vlnová délka [m]

v ... rychlost zvuku v materiálu [m/s]

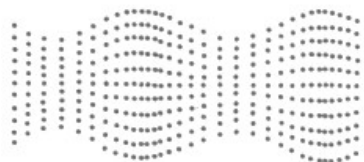
f ... frekvence pohybu [Hz]

Čisté podélné vlny vznikají jenom v prostorově neomezeném médiu nebo v rozměrech několikanásobně větších než je vlnová délka. Kvůli geometrickému tvaru vodiče energie (převodník, akustický nástroj - sonotroda) v ultrazvukových zařízeních užívaných v technologii spojování je obvykle přítomna směs příčných a podélných vibrací, tzv. rozšiřující se vlna (obr. 3.2). [12, s. 6]



Obr. 3.1: Podélná vlna [12, s. 6]

λ -vlnová délka



Obr. 3.2: Rozšiřující se vlna [12, s. 6]

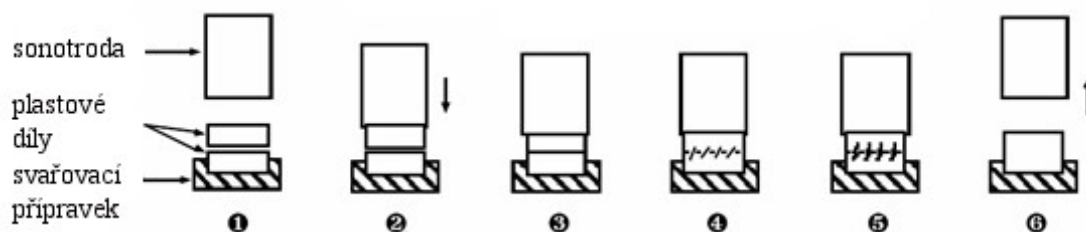
3.2 Princip ultrazvukového svařování

Ultrazvukové spojování plastů zahrnuje spojování nebo přetváření termoplastů prostřednictvím tepla generovaného mechanickým pohybem o vysoké frekvenci. Toho lze dosáhnout konvertováním elektrické energie na mechanický pohyb (vibrace) o vysoké frekvenci, který v místě spoje generuje třecí teplo. Vibrace aplikované na díl za působení tlaku, resp. síly generují ve svarové stykové ploše třecí teplo, což způsobuje tavení materiálu a vytvoření molekulární vazby mezi svařovanými plastovými díly. Dle základního zákona fyziky je definice tepla formulována jako energie spojená s nahodilým pohybem nebo vibracemi molekul. Teoreticky pouze při teplotě absolutní nuly pohyb molekul ustane. Intenzita vibrací molekul v látce určuje její teplotu. S rostoucí intenzitou vibrací roste tedy i teplota látky. Soustředěním zvukových vibrací o vysoké frekvenci na specifickou oblast termoplastu dojde k rozpohybování jeho molekul a teplota materiálu stoupá dokud nedojde k tavení materiálu, pak je vytvořena vazba se sousedním dílem (svařování) nebo materiál přebírá tvar podle tvaru nástroje (přetváření). Nástroj tedy vysílá zvukové vibrace, které procházejí skrz materiál a jsou soustředěny do požadovaného místa, kde způsobí generování tepla v samotném materiálu. [10, s. 1]

Ultrazvukové svařování je nejběžnější aplikace ultrazvukového spojování. Při svařování je akustický nástroj (sonotroda) přiveden do kontaktu s jedním ze svařovaných dílů a za užití tlaku a vibrační ultrazvukové energie, která prochází materiálem, dochází ke generování třecího tepla ve svarové ploše v samotném materiálu mezi svařovanými díly. Plastový materiál se ve svarové ploše taví a teče. Když jsou vibrace ukončeny, nastává tuhnutí roztaveného materiálu a svařované díly jsou tak spojeny dohromady. [10, s. 2]

3.2 Fáze ultrazvukového svařování

Ultrazvukové svařování (v tomto případě strojní svařování) je popsáno několika fázemi zobrazenými na obr.3.3. Existují také ruční ultrazvukové svářecí zařízení, kde je svařovací nástroj veden rukou pracovníka.



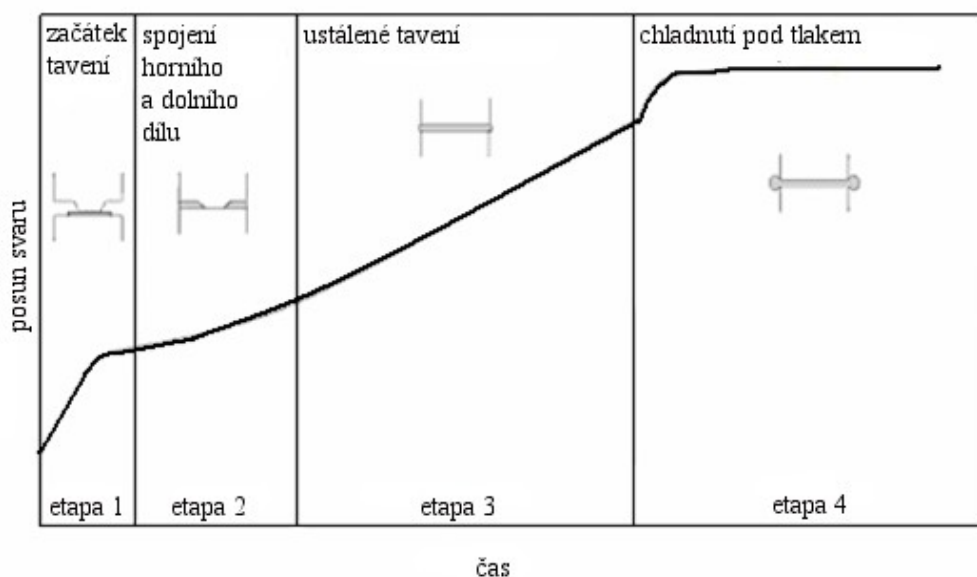
Obr. 3.3: Fáze ultrazvukové svařování [10, s. 3]

Popis jednotlivých fází: [10, s. 3]

- 1) Upnutí dílů do přípravku - Dva díly z termoplastu určených ke svaření se umístí na sebe do svařovacího přípravku ve směru pohybu nástroje.
- 2) Kontakt se sonotrodou - Sonotroda z titanu nebo pokoveného hliníku je přivedena do kontaktu s horním svařovaným dílem.
- 3) Působení tlaku - Kontrolovaným tlakem působícím na sonotrodu dojde ke stlačení dílů k sobě proti svařovacímu přípravku.
- 4) Svařovací čas - Sonotroda vertikálně vibruje s přednastavenou frekvencí a vibrace v řádu mikrometrů působí po předdefinovanou dobu - svařovací čas. Při správném tvaru dílu jsou mechanické vibrace směřovány přímo do ohraničených kontaktních míst mezi oběma díly. Přenášené vibrace skrz materiál ve svarových plochách generují třecího teplo. Když teplota ve svarových plochách dosáhne bodu tavení, tak se materiál nataví a začne téci. Pak jsou vibrace ukončeny, což umožní natavenému materiálu zchladnout.
- 5) Čas dotlaku - Na díly během tuhnutí působí po předdefinovaný čas přitlačná síla, což umožňuje spojení dílů během chladnutí a tuhnutí plastu. Zvýšená pevnost a těsnost spoje může být dosažena použitím vyšší síly během fáze přitlaku.
- 6) Návrat sonotrody - Jakmile dojde ke ztuhnutí nataveného materiálu, tak je přitlačná síla deaktivována a sonotroda se vrací do výchozí polohy. Oba díly vložené do přípravku jsou nyní svařeny a mohou být z přípravku vyjmuty.

Etapy vlastního svařování pro tupý spoj s usměrňovačem energie jsou zobrazeny ve svařovacím grafu, který zobrazuje vzájemný posuv svařovaných dílů na čase (obr. 3.4). Vibrace jsou během svařování kolmé na svarovou plochu a v etapě 1 je špička usměrňovače energie tlačena do kontaktu s protikusem. Generování tepla je v místě špičky největší a usměrňovač energie se taví a teče do spoje. Vzájemné posunutí dílů

nastává jako výsledek toku taveniny, který prudce narůstá a pak se zpomalí jak se roztavený usměřňovač energie rozprostírá a dostává se do kontaktu s plochou spodního dílu. Rychlost tavení materiálu pak klesá. V etapě 2 se svarové plochy setkají a rychlost natavování vzrůstá. Etapa 3 je charakteristická ustáleným stavem tavení a ve spoji je vytvořena konstantní tloušťka natavené vrstvy s konstantní teplotní distribucí. Po uplynutí přesně stanoveného času nebo po dosažení konkrétní energie, výkonové hladiny nebo vzdálenosti je ultrazvuková energie vypnuta a startuje etapa 4. V etapě 4 je udržován mezi díly tlak, což může způsobit vytlačení taveniny z místa spoje. V této etapě je vytvořena molekulární vazba a svar chladne. [11, s. 15 - 16]



Obr. 3.4: Etapy ultrazvukového svařování s usměřňovačem energie [11, s. 16]

3.4 Výhody a nevýhody ultrazvukového svařování

Mezi výhody ultrazvukového svařování patří rychlost, čistota, účinnost a opakovatelnost procesu, který vytváří pevné a jednotné spoje při velice nízké spotřebě energie. Proces nevyžaduje žádná rozpouštědla, lepidla, mechanické spojení nebo externí teplo. Výsledné svařence jsou pevné, čisté a lze spojovat díly z různých typů termoplastů. Vlastní svařování probíhá velice rychle díky rychlému přenosu energie do spoje a jejího prudkého uvolnění ve formě tepla v místě svaru. Ultrazvukové nástroje nebo aplikace ultrazvuku mohou být velice rychle měněny, což poskytuje flexibilitu a všestrannost. Navíc poměrně nízké vstupní investice na

ultrazvukové zařízení proti vysoké spolehlivosti, dlouhé životnosti a stálému opakovatelnému výkonu činí z ultrazvukového svařování preferovanou metodu spojování plastových dílů. Ultrazvukové svařování je široce akceptované a užívané v automobilovém, zdravotnickém, elektrickém, elektronickém, komunikačním, spotřebním, hračkářském, textilním a obalovém průmyslu. Je ekonomickým procesem, který může význačně zvýšit produktivitu a snížit náklady na spojení.

[10, s. 3 - 4]

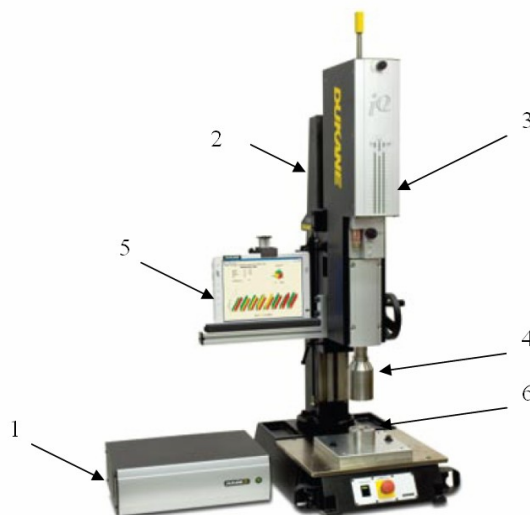
Omezení ultrazvukového svařování spočívá v nemožnosti zhotovení rozměrných spojů v jedné operaci. Ultrazvukové vibrace mohou rovněž poškodit elektrické komponenty, ačkoli užití vyšších frekvencí může toto poškození redukovat. V závislosti na svařovaných dílech může být cena svařovacího přípravku vysoká.

[11, s. 16]

3.4 Ultrazvukové svařovací zařízení

3.4.1 Obecný popis

Ultrazvukové svařovací zařízení se obecně skládá ze dvou hlavních částí, kterými jsou generátor elektrického signálu a lisovací jednotka s pohyblivým pojezdem, do které se upíná ultrazvukový rezonátor. Pohyb pojezdu je převážně zajištěn pneumatickým válcem, ale existují zařízení i s elektrickým servopohonem. Některá zařízení jsou již přímo vybavena počítačem, který zpracovává naměřená data a přes dotykový display se uskutečňuje nastavování svařovacích parametrů a práce s daty. U jednodušších modelů probíhá nastavování parametrů přes ovládací panel generátoru elektrického signálu nebo je lze připojit k externímu počítači a pomocí nainstalovaného softwaru nastavovat svařovací parametry a zároveň sbírat data a grafy jednotlivých svařovacích cyklů. Na obr. 3.5 je zobrazeno ultrazvukové svařovací zařízení od firmy Dukane - model IQ série s integrovaným počítačem a dotykovým displayem.



Obr. 3.5: Svařovací zařízení firmy Dukane - série IQ [10, s. 7]

1 - generátor elektrického signálu; 2 - lisovací jednotka; 3 - pojezd lisovací jednotky;
4 - ultrazvukový rezonátor uložený v pojezdu lisovací jednotky; 5 - dotykový display; 6 - svařovací přípravek

3.4.2 Základní systém ultrazvukového svařovacího zařízení

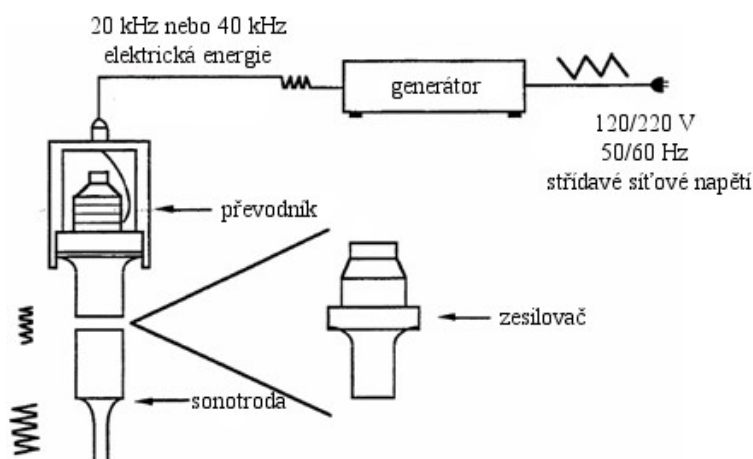
Základní systém ultrazvukového svařovacího zařízení (obr. 3.6) je složen převážně ze čtyř hlavních komponent a těmi jsou:

- generátor - zdroj vysokofrekvenčního střídavého napětí (signálu)
- převodník - měnič elektrické energie na mechanickou
- zesilovač mechanických kmitů
- akustický nástroj - sonotroda

[10, s. 4]

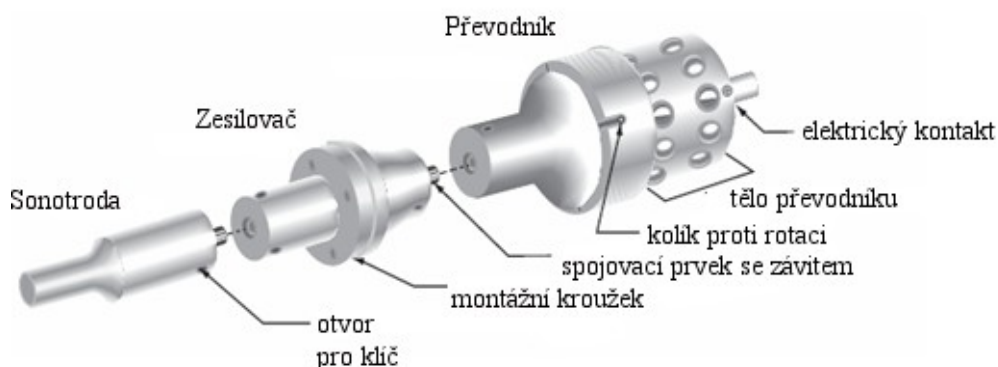
Generátor mění standardní elektrickou energii (120-240 V, 50/60 Hz) na elektrickou energii s frekvencí, ve které je daný systém navrhnut. Ačkoli je po celém světě užíváno několik frekvencí, nejběžnějšími frekvencemi pro průmyslovou produkci jsou frekvence 15, 20, 30 a 40 KHz. Elektrická energie o vysoké frekvenci produkovaná generátorem je vedena kabely do převodníku, který mění elektrickou energii na mechanické vibrace o malé amplitudě. Tyto vibrace jsou přeneseny do zesilovače, který zvýší nebo sníží jejich amplitudu. Amplituda je definována jako vychýlení od vrcholu k vrcholu nebo vzdálenost vibrací zesilovače nebo sonotrody

na její pracovní ploše. Velikost požadované amplitudy závisí na materiálu plastu, typu aplikace a na činnosti, která má být vykonávána. Vibrace se přenášejí do sonotrody o správné velikosti a tvaru pro zajištění nejlepšího přenosu vibrační energie do svařovaných dílů. V závislosti na tvaru sonotrody dochází k zeslabení nebo zesílení amplitudy vibrací sonotrodou. [10, s. 4 - 5]



Obr.3.6: Komponenty základního systému ultrazvukového svařování [10, s. 5]

Převodník, zesilovač a sonotroda jsou sešroubovány v jeden celek nazývaný ultrazvukový rezonátor (obr. 3.7). Přeměna elektrické energie na mechanickou se děje pomocí keramických piezoelektrických elementů, které jsou vystaveny střídavému elektrickému napětí, což způsobuje jejich rozměrové roztahování a smršťování. Rozměrové změny elementů jsou velice malé, ale vytváří se na nich velká síla. [10, s. 47]



Obr. 3.7: Rozložený mechanický ultrazvukový rezonátor [13, s. 42]

Zesilovač slouží jako připojovací bod pro ultrazvukový rezonátor do pojezdu lisovací jednotky v jeho uzlovém bodě, kde jsou konstruovány kroužky pro upnutí. Zesilovače jsou buď z titanu nebo hliníku. Titanové zesilovače jsou sice dražší, ale jsou robustnější a vydrží mnoho cyklů montáže a demontáže. Hliníkové zesilovače jsou doporučovány pro kontinuální aplikace, kde je přínosem rozptýl tepla. Zesilovače mají různé zesílení a jsou mechanickým prostředkem pro úpravu amplitudy ultrazvukového rezonátoru. [10, s. 49 - 50]

Tvar a velikost sonotrody jsou určovány požadavkem zákazníka pro konkrétní aplikaci. Pro frekvenci 20 kHz je typická sonotroda typu půlvlnné rezonanční tyče. Její molekuly se konstantně prodlužují a zkracují 20000 krát za sekundu. Sonotroda je tedy neustále namáhaná tlakem a tahem. Její délka se tedy zkracuje a prodlužuje. Je důležité zvážit materiál, z kterého bude sonotroda vyrobena. Materiálem může být hliník, titan nebo ocel. Každý z uvedených materiálů má nějakou únavovou pevnost, akustické vlastnosti a tvrdost povrchu. [10, s. 57]

3.5 Svařovací parametry

Důležitými procesními parametry ultrazvukového svařování je svařovací čas (čas, po který jsou aplikovány vibrace), svařovací tlak nebo síla, čas dotlaku (čas pro tuhnutí a chladnutí po ukončení vibrací sonotrody), síla dotlaku, spínací síla (síla vyvinutá na díl sonotrodou před iniciací vibrací sonotrody), svařovací výkon a amplituda vibrací. Před iniciací vibrací musí nastat řádný kontakt mezi sonotrodou a vrchním svařovaným dílem. Svařování nemůže být úspěšně provedeno pokud sonotroda vejde do kontaktu s dílem po iniciaci vibrací. [11, s. 31]

Frekvence

Nejvíce zařízení s frekvencí 20 kHz pracovalo do začátku 80. let. Frekvence 30 a 40 kHz jsou nyní zcela běžné a navíc se používá pro semikrystalické materiály nízká frekvence 15 kHz. Výhodou zařízení s vyšší frekvencí je menší hluk, menší velikost komponent svařovacího zařízení (nástroje pro frekvenci 40 kHz jsou poloviční oproti nástrojům pro frekvenci 20 kHz), zvýšená ochrana dílů proti redukovanému cyklickému namáhání, vylepšená kontrola mechanické energie, nižší svařovací síly a vyšší rychlost procesu. Mezi nevýhody patří snížení výkonové schopnosti vlivem

malých komponentů zařízení a nesnadnost svařování ve vzdáleném poli kvůli redukci amplitudy. Vyšší frekvence jsou obecně užívány pro malé, choulostivé díly jako například elektrické spínače. Se svařovací frekvencí 15 kHz může být svařena většina termoplastů rychleji a ve většině případů s menší degradací materiálu oproti frekvenci 20 kHz. Díly podřadně svařené při frekvenci 20 kHz, zvláště vyrobené z vysoce konstrukčních plastů, mohou být efektivně svařovány na frekvenci 15 kHz. Při nižších frekvencích má sonotroda delší rezonační délku a může být vyrobena větší ve všech směrech. Další důležitou výhodou frekvence 15 kHz je výrazně menší zeslabení vibrací při průchodu skrz termoplast, což dovoluje svařovat měkčí plasty a užívat větší vzdálenosti přesunu vibrací při svařování ve vzdáleném poli oproti vyšším frekvencím. [11, s. 31]

Svařovací čas

Svařovací čas je doba, po kterou sonotroda vibruje na jeden svařovací cyklus. Správný čas je pro každou aplikaci určen metodou pokusu a omylu. Zvyšováním svařovacího času se obecně zvyšuje pevnost svaru dokud není dosaženo optimálního času. Další zvyšování času vede buď ke snížení pevnosti svaru nebo jenom ke slabému zvýšení pevnosti svaru a současně dochází k zvětšování výronku materiálu a možnosti proznačení dílu. [11, s. 31]

Svařovací tlak/síla

Svařovací tlak poskytuje statickou sílu nezbytnou k propojení sonotrody a dílů pro přenos vibrací. Určení optimálního svařovacího tlaku je nezbytné pro dobré svařování. Svařovací tlaky, které jsou příliš nízké, mají obecně za následek nízký přenos energie nebo neúplný tok taveniny a vedou k dlouhému svařovacímu cyklu. Zvýšením svařovací síly nebo tlaku klesá svařovací čas nezbytný k dosažení stejného posunutí svařovaného dílu. Pokud je tlak příliš velký, větší objem taveniny má za následek srovnání molekul do směru toku a snížení pevnosti spoje. Může také dojít k proznačení dílu nebo přetížení sonotrody. Nejčastěji se svařuje při konstantním tlaku nebo síle. U některých systémů lze svařovací sílu v průběhu cyklu měnit, kde profil svařovací síly s časem klesá. Klesající tlak nebo síla redukuje množství materiálu vytlačeného mimo spoj, poskytuje více času pro mezimolekulovou difuzi, redukuje

orientaci molekul a zvyšuje pevnost spoje. U materiálů s nízkou viskozitou taveniny, jako jsou polyamidy, to může význačně zlepšit pevnost svaru. [11, s. 31]

Amplituda

Při ultrazvukovém svařování s užitím usměrňovače energie je průměrná rychlost ohřevu závislá na komplexním ztrátovém modulu materiálu, operační frekvenci a užitém napětí. Komplexní ztrátový modul termoplastů je silně teplotně závislý. Při dosažení teploty tání nebo teploty skelného přechodu ztrátový modul narůstá a více mechanické energie je přeměňováno na tepelnou energii. Po iniciaci zahřívání teplota ve svařovacích plochách prudce roste. Užití napětí je úměrné amplitudě vibrací sonotrody, takže zahřívání svařovacích ploch může být řízeno změnou amplitudy vibrací. Amplituda je důležitý parametr pro řízení rychlosti stlačování taveniny termoplastů. Při vysokých amplitudách jsou svařové plochy zahřívány rychleji, teplota roste a natavený materiál teče vyšší rychlostí, což vede ke zvýšenému uspořádání molekul, tvorbě výrazného výronku materiálu a nižší pevnosti svaru. Vysoké amplitudy jsou nezbytné k iniciaci tavení. Příliš nízké amplitudy produkují nestejný počátek tavení a předčasné tuhnutí nataveného materiálu. S rostoucí amplitudou se zvyšuje množství vibrační energie, která je rozptýlena v termoplastu a svařované díly jsou pod větším napětím. Obecně se užívá po celou dobu svařovacího cyklu konstantní amplituda o takové nejvyšší hodnotě, která nezpůsobí nadměrné poškození svařovaných dílů. Pro semikrystalické termoplasty je vliv amplitudy vibrací mnohem větší než pro amorfnní termoplasty. Pravděpodobně je to kvůli větší energii vyžadované pro tavení a svařování semikrystalických plastů. Amplituda může být nastavena mechanicky výměnou zesilovače, sonotrody nebo elektricky změnou napětí dodávaného do převodníku, která je vhodná pro jemné nastavování. Materiály s vysokou teplotou tavení, svařování ve vzdáleném poli a semikrystalické plasty obecně vyžadují vyšší amplitudy než amorfnní materiály a svařování v blízkém poli. Typické rozsahy amplitudy od vrcholu k vrcholu jsou 30 - 100 μm pro amorfnní termoplasty a 60 - 125 μm pro semikrystalické termoplasty. Profilování amplitudy, při kterém dochází k snížení amplitudy během svařovacího cyklu, se užívá k dosažení dobrého toku taveniny a stálých vysokých pevností svaru. Při kombinaci profilování amplitudy a síly je pro iniciaci tavení užito vysokých amplitud a sil, poté jsou sníženy k redukci orientace molekul. [11, s. 32]

3.6 Řízení procesu svařování

Po padesát let se ultrazvukové svařování plastů spoléhalo na jednoduchou metodu procesní kontroly nazývanou svařování na čas. Nastavení času je jednoduché a spolehlivé, ale má značné nedostatky. Především je to systém s otevřenou smyčkou bez zpětné vazby z procesu. To znamená, že nemá schopnost monitorovat sebe sama a sebe sama korigovat při odchylkách na dílech, elektrického výkonu nebo fungování svařovacího systému. Intenzivnější zaměření na kvalitu produktů a užití ultrazvuku ve více kritických aplikacích (např. v medicíně a automobilovém průmyslu) přitáhlo pozornost k nové generaci kontrol svařovacího procesu. Ty nabízejí široký rozsah nových schopností, ale největší pozornost byla zaměřena na schopnost svařovat jinými metodami než je metoda svařování na čas. Mezi tyto metody patří svařování na celkovou energii, výkon, relativní a absolutní vzdálenost. [14]

Svařování na čas

Při metodě svařování na čas sonotroda sjíždí, dotýká se dílu a je vybudována spínací síla. V tomto bodě je zahájeno ultrazvukové svařování a trvá po specifický čas, který je považovaný za nezbytně nutný k zajištění řádného spojení dílů. Po uplynutí přednastavené doby ultrazvuková aktivita končí a sonotroda se vrací do základní pozice. Metoda svařování na čas často selhává při požadavku přísné kvality a dodržení standardů. Problém je ustavení přesného času, který je požadován k dosažení dané pevnosti spoje. To je především obtížné, když díly zahrnují složitou geometrii nebo jsou vyráběny z neznámých materiálů nebo směsí, jejichž absorpci energie je těžké předpovídat. Svařování na čas ignoruje fakt, že díly jsou odlišné. Základní metoda se nemůže přizpůsobit pro odchylky na dílech vzniklé rozdílem kavit u násobných nástrojů nebo změnami podmínek na plochách dílu, které mohou být způsobeny např. nečistotami. Tyto a další faktory mají tendenci narušit korelaci mezi svařovacím časem a integritou svaru. Metoda svařování na čas není také schopna ověřit přesnost svařování nebo diagnostikovat problémy. [14]

Svařování na energii

Při této metodě je svařování vedeno do bodu, kde je do svarového spoje dodána definovaná energie. Protože energie je rovna výkonu násobeného časem, jedna úloha

kontroly je zvýšit nebo snížit svařovací čas k dosažení konstantní hodnoty energie dodané do svaru. Ukázalo se, že dosažení definované hladiny celkové energie negarantuje lépe svarovou integritu než u metody svařování na čas. Kolísání vstupního výkonu nevyhnutelně ovlivňuje ultrazvukový svařovací systém, přestože výrobci vynalezli korektivní zařízení k minimalizaci ovlivnění. [14]

Svařování na výkon

Při této metodě je výkon monitorován po celou dobu svařovacího cyklu a ultrazvukové vibrace jsou ukončeny, když je dosaženo konkrétní výkonové hladiny. [11, s. 24]

Svařování na vzdálenost

Nástup zařízení schopných velice přesně odměřovat vzdálenost (lineární enkodéry) umožnil svařování na vzdálenost. Při svařování na relativní vzdálenost enkodér zaznamenává kontakt mezi sonotrodou a dílem a ustavuje pozici tohoto kontaktu jako referenční bod pro měření svařovací vzdálenosti. Po dosažení spínací síly pro ultrazvuk je zahájeno svařování, které trvá dokud sonotroda nevykoná přednastavenou hodnotu posuvu. I přes odchylky dílů by se měly výsledky každého cyklu shodovat v hloubce svaru, objemu taveniny a relativní vzdálenosti. Svařování na absolutní vzdálenost užívá enkodér k detekci polohy sonotrody pro dosažení přednastavené absolutní vzdálenosti. Výstupem je identická výška nebo další rozměr pro všechny svařované díly. [14]

3.7 Analýza a řešení problémů ultrazvukového svařování

Mnoho znaků může indikovat změnu svařovacího procesu. Mezi indikátory problémů s dílem patří pokles pevnosti svaru, zvýšení výronku a objevení se vzhledového poškození. Problém se svářecím zařízením nebo sonotrodou značí zvýšení příkonu, změna ve zvukovém projevu svařovacího zařízení (typicky zjevné nižší frekvence) a přetížení. Prvním krokem k eliminaci neviditelných problémů je záznam nastavení svařovacího procesu, které zahrnuje svařovací čas, dobu dotlaku, spínací mód, amplitudu, výšku pojezdu, tlak, kritické rozměry dílu, fotografie svářecího zařízení zobrazující připojení a tvar sonotrody a přípravku. [15]

Existuje mnoho nepřímo zjevných faktorů, které mohou negativně ovlivnit kvalitu svaru. Nejčastější příčinou problémů v dlouhodobě běžícím procesu je opotřebení formy pro výrobu svařovaných dílů. Opotřebení je pomalý, ale jistý děj při každém vstřikování. Protože rozměry svarových ploch jsou relativně malé v porovnání s velikostí celého dílu, změny v jejich velikosti nebo tvaru mohou ujít do značné míry bez povšimnutí. [15]

K nalezení zdroje problémů týkající se kvality svaru a jeho konzistence by měly být tedy zkoumány odchylky v rozměrových tolerancích dílů, napětí po vstřikování, degradace materiálu, zkroucení a propadliny. Je nutné kontrolovat kavitu po kavitě a hledat odchylky v těsnosti vzájemně lícujících protikusů. Stejně tak je nutné kontrolovat lícování dílů se sonotrodou a svařovacím přípravkem. Další úvahy zahrnují přítomnost separační látky pro odformování nebo jinou kontaminaci ve spojovací ploše a možné změny v plastovém materiálu vlivem změn u prodejce nebo obsahu recyklátu. [16]

Další důležitým faktorem jsou změny prostředí jako je okolní žár, chlad nebo vlhkost. Velmi nízké teploty mohou zapříčinit, že se polymery stávají křehkými, což může způsobit prasknutí svaru spíše než při normální svařovací teplotě. Vyšší teplota může zase vést k delšímu času tuhnutí, což způsobuje problémy pokud se pracuje s krátkým časem dotlaku. Některé materiály jsou méně citlivé na změny procesu. Přechodem na jednodušejší svařitelný materiál (např. ABS) se dosáhne lepší konzistence v procesu. [15]

Pravděpodobně jeden z nejvíce přehlížených faktorů přispívající ke svařovacím problémům je změna v čase mezi vystříknutím a svařováním dílu. Řádně nastavený svařovacího proces se může výrazně lišit, když se svařují studené díly v kontrastu ke svařování teplých dílů. Obecně se nedoporučuje svařovat dohromady studené a teplé díly. [15]

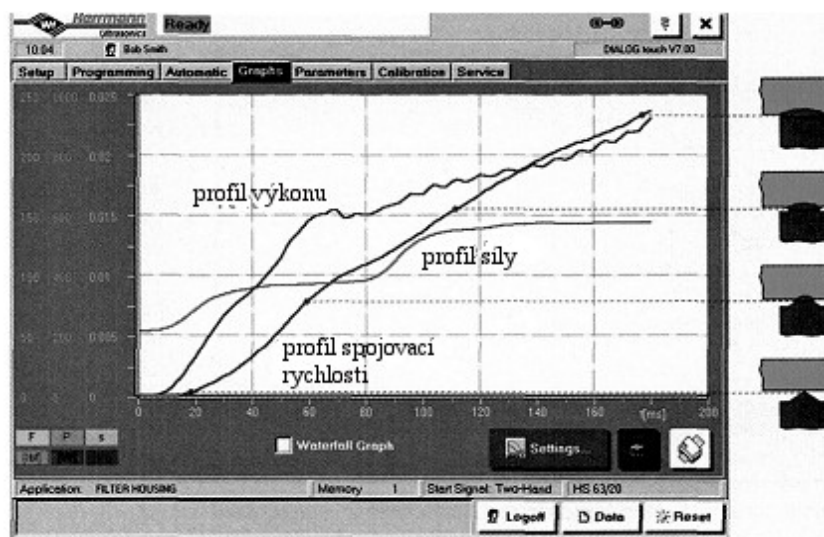
Pokud je zjištěno, že problém není způsoben svařovanými díly, může být problém v ultrazvukovém nástroji. Příležitostně se může objevit prasklina v sonotrodě. Zatímco většina sonotrod nebude po vytvoření praskliny fungovat vůbec, některé budou a často vydávají pronikavé zvonění nebo běží při vyšším příkonu než normálně. Je velice důležité přerušit užívání prasklé sonotrody, protože to může mít za následek tvorbu nadměrného napětí v převodníku vedoucího až ke zničení jeho keramických piezoelektrických elementů. [15]

Svařovací přípravek má značný efekt na přesnost a preciznost svarů. Je nezbytné, aby přípravek poskytoval podporu celé svařovací ploše a nedal prostor pro přesazení dílů během zatížení. Když se svařuje měkký materiál (PP, PE) je nutné aby byla zajištěna podpora kolem svarové plochy. Měkký materiál má sklon k deformaci směrem ven, která bude ztěžovat nebo bránit řádnému svařování. [15]

Grafická analýza

Výzkum prokázal, že konzistence tavného výkonu má přímý vliv na pevnost spoje. Čím více se blíží profil rychlosti spojování (svařování) lineárnímu průběhu, tak je tavící výkon stabilnější, molekulární struktura taveniny je více homogenní a svar je pevnější. Grafická analýza rychlosti spojování, svařovacího výkonu a síly se jeví jako vysoce efektivní nástroj k odstranění řady problémů zahrnujících nekonzistenci svarů, nízkou pevnost svaru a nehermetičnost spoje. Počítačově kontrolované ultrazvukové svařovací zařízení v současné době nabízí vizualizaci svařovacího procesu prostřednictvím svařovacího grafu. Je to vynikající nástroj pro pochopení a optimalizaci svařovacího procesu. Typický graf svařovacího procesu (obr. 3.8) ukazuje sílu, výkon a rychlost spojování. Na pravé straně grafu je ukázán postup zatlačování usměrňovače energie integrovaného ve spodním dílu do protikusu. Třecí teplo generované vibracemi a tlakem zajišťuje tavení na vrcholu usměrňovače energie a kontaktní plochy protikusu. Tok taveniny pokračuje dokud svarové plochy nejsou dohromady homogenně spojeny. Snížení rychlosti a zploštění profilu křivky rychlosti spojování v důsledku přiblížení se obou svařovaných dílů indikuje, že svařování může být v tomto bodě ukončeno. Třecí teplo je řízeno pomocí amplitudy vibrací sonotrody a silami aplikovanými na díly během svařování. Větší amplituda a síla zapříčiní větší třecí teplo v plastu. Profil rychlosti spojování bude záviset na plastu (amorfní nebo semikrystalický), svařovací ploše, tvaru svarových ploch a celkové velikosti a tvaru spojovaných dílů. Amorfní termoplasty mají pozvolnou fázi skelného přechodu (měkčení a tavení), což má za následek pozvolný nárůst sklonu křivky spojovací rychlosti. K dosažení úspěšného spojení lze užít menší amplitudu a sílu po delší svařovací čas. Rozsah amplitudy a síly pro amorfní termoplasty je obvykle velmi široký. Semikrystalické plasty procházejí nejprve amorfní fází dříve než vstoupí do fáze krystalické, která má ostře definovaný bod

tání. K dosažení požadovaného tavení je potřeba vyšší amplitudy a síly. Rozsah amplitudy a síly k dosažení svaru je velmi úzký. [16]



Obr. 3.8: Typický svařovací graf [16]

Analýza křivky spojovací rychlosti, dat zjištěných z testů pevnosti svaru a vzhledu dílu pomáhá technologovi nastavit svařovací amplitudu a sílu. Studie ukazují, že konstantní spojovací rychlost sonotrody produkuje mnohem homogennější molekulární vazbu a silnější svar. Změna amplitudy a síly ovlivní sklon křivky spojovací rychlosti. Pokud nebude k dispozici dostatečné třecí teplo k udržení toku plastu při stejné rychlosti po celou dobu cyklu, bude to patrné na křivce spojovací rychlosti. Podle změny sklonu křivky spojovací rychlosti může technolog zvýšit svařovací sílu k udržení konstantního toku plastu. Cílem je nastavení amplitudy a svařovací síly tak, aby křivka svařovací rychlosti byla pokud možno lineární jak to jen jde. Průběh křivky výkonu dává vizuální záznam o výkonu potřebného k udržení konstantní amplitudy po celou dobu svařování. Ostrý vrchol ve výkonu, nadměrný příkon ve vztahu k maximálnímu výkonu generátoru nebo kolísavý příkon negativně ovlivňuje pevnost, spolehlivost a opakovatelnost svaru. Vyšší amplituda a síla požadují vyšší výkonové hladiny a obráceně. Křivka výkonu může říci, zda-li svařovací systém je nedostatečně zatížen nebo přetížen. [16]

Nejužitečnější graf svařovacího procesu je křivka spojovací rychlosti, která je pravdivým indikátorem aktuálního toku taveniny při spojování dílů. Náhlé nárůsty sklonu můžou indikovat, že materiál byl vytlačen mimo správný směr a díly po sobě

nechtěně kloužou (studené tváření). To by se mělo také projevit poklesem výkonu. Pokles sklonu křivky znamená snižování rychlosti kvůli tomu, že proces vyčerpá všechny detaily spoje. Další energie je užita k tavení ploch mimo zamýšlenou svařovací plochu. To by vedlo k trhlinám, proznačení nebo k odírání stykové plochy od sonotrody. Pokles rychlosti doprovázený špičkou v křivce výkonu může indikovat, že výstupní výkon generátoru nemusí být dostatečný pro zamýšlený svar. [16]

3.8 Tvar svarových ploch

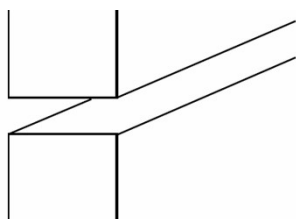
3.8.1 Základní požadavky

Tvar svarových ploch u ultrazvukového svařování je jedním z rozhodujících faktorů pro dosažení optimálních výsledků spojení. Konkrétní tvar kontaktních svarových ploch je závislý především na typu svařovaného plastu, geometrii dílu a také na požadavcích na svar. Existuje mnoho rozdílných tvarů spojů a každý z nich má své výhody. Tvar svarových ploch musí splňovat následující tři základní podmínky:

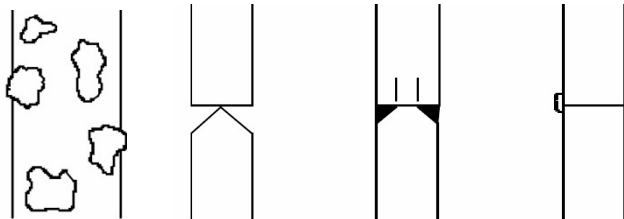
- stejná kontaktní plocha - po celé délce svaru jsou oba díly v těsném kontaktu a pokud je to možné, tak by svar měl ležet pouze v jedné svařovací rovině
- zajištění malé počáteční kontaktní plochy mezi oběma spojovanými díly - to vyžaduje méně energie a tedy kratší čas pro započítí a dokončení tavení mezi spojovanými díly
- užití prostředků pro zajištění vzájemné polohy dílů během svařování - fixační prvky (kolíky, pera, příruby, kanály, atd.), které jsou často již vystříknuté s dílem, zajišťují vzájemnou polohu svařovaných dílů. (poskytnutí vedení dílů pomocí sonotrody nebo přípravku není nejlepším řešením) [10, s. 17]

Důležitost výše uvedených podmínek lze demonstrovat u tupého spoje. Při této geometrii svarových ploch vzniká svar pouze v nejvyšších místech svarových ploch, což má za následek nekonzistentní a nepravidelný svar. Prodloužení svařovacího

času pro zvýšení tavení jenom zvýší velikost svařené plochy v původních místech a zapříčiní nadměrný výronek nataveného materiálu z místa spoje (obr. 3.9). Změnou geometrie jedné svarové plochy do tvaru špičky bude produkován spoj s dobrým vzhledem, ale malou pevností. Když se dosáhne dobré pevnosti spoje, vzniká nadměrný výronek nataveného materiálu, který znehodnotí vzhled svaru (obr. 3.10). [10, s. 17 - 18]



Obr. 3.9: Tupý spoj [10, s. 17]

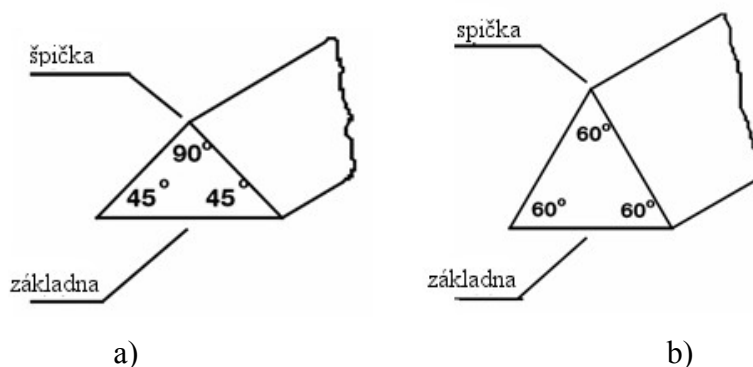
Obr. 3.10: Problémy při upravení
jedné ze stěn dílu do tvaru špičky [10, s. 18]

3.8.2 Usměrňovač energie

Usměrňovač energie byl vyvinut k poskytnutí zvláštního objemu materiálu pro roztavení, aby mohlo být dosaženo dobré pevnosti spoje bez nadměrného výronku materiálu. Usměrňovač energie je obecně doporučen pro amorfnní materiály. Usměrňovač je výstupek trojúhelníkového profilu implementovaný do stykové plochy dílu, který je většinou na celé délce obvodu spoje. Když je ultrazvuková energie přenášena skrz díl pod tlakem v čase, dochází ke koncentraci této energie ve špičce usměrňovače (v místě, kde se špička usměrňovače dotýká stykové plochy protikusu). To vede k rychlému generování tepla, které způsobí tavení usměrňovače. Natavený materiál teče napříč stykovou plochou a vytváří se molekulární vazba mezi oběma svařovanými díly. [10, s. 18]

Usměrňovač energie splňuje pouze dva základní požadavky na tvar svarových ploch a těmi jsou stejná a malá počáteční kontaktní plocha. Usměrňovač není prostředkem pro zajištění vzájemné polohy svařovaných dílů a také neposkytuje možnost kontrolovat velikost výronku materiálu. Tyto požadavky musí být začleněny do tvaru dílů. Základní tvar usměrňovače pro amorfnní plasty tvoří pravoúhlý trojúhelníkový profil s vrcholovým úhlem 90° a úhly 45° při základně. Výška je tedy polovičkou délky základny (obr. 3.11 a). Výška usměrňovače energie může

ležet v rozmezí 0,127 mm až 0,762 mm a délka základny v rozsahu 0,254 mm až 1,524 mm. Pro polykarbonáty, akryláty a semikrystalické plasty je doporučován usměrňovač s rovnostranným trojúhelníkovým profilem (obr. 3.11 b). Výška usměrňovače je 0,866 krát větší než základna. Velikost základny by se měla pohybovat v rozsahu 0,254 mm až 1,27 mm. [10, s. 18 - 19]



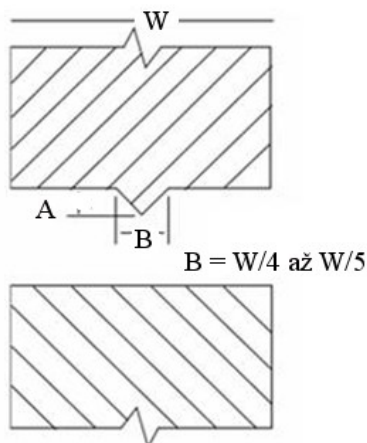
Obr. 3.11: Usměrňovač energie - a) pro amorfnní plasty; b) pro semikrystalické plasty [10, s. 19]

3.8.3 Typy spojů

Existují různé konstrukční modifikace níže popsaných spojů, v této kapitole je uveden pouze jejich základní tvar.

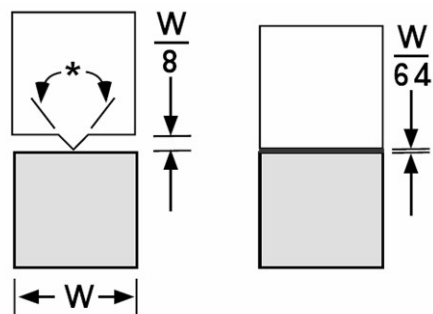
Tupý spoj s usměrňovačem energie

Nejběžnějším základní tvarem spoje je tupý spoj s usměrňovačem energie (obr. 3.12). Šířka usměrňovače se pohybuje mezi 20 až 25% tloušťky stěny dílu. Když je tloušťka stěny příliš velká a vypočítaná velikost základny by byla větší než maximální doporučená hodnota, měly by být užity dva paralelní usměrňovače. Tento tvar produkuje svar napříč celým řezem stěny s malým výronkem materiálu, který je obvykle viditelný ve zhotoveném spoji. Díly by měly být navrženy tak, aby si samy zajistily vzájemnou pozici během svařování. Pokud to není možné musí být navržen svařovací přípravek, který poskytne vodící prvky nezbytné k zajištění vzájemné polohy dílů. [10, s. 19 - 20]



Obr. 3.12: Tupý spoj s usměrňovačem energie [3, s. 19]

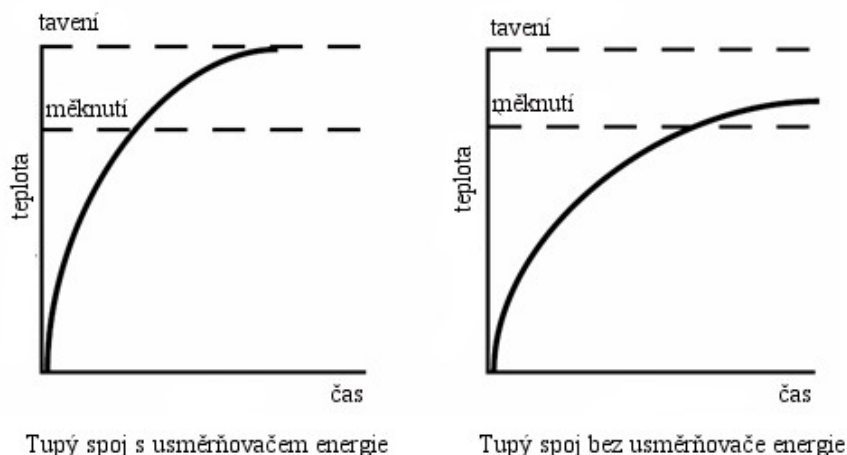
A - výška usměrňovače energie; B - šířka základny usměrňovače energie;
W - tloušťka stěny



Obr. 3.13: Vzájemná poloha před a po svaření [17]

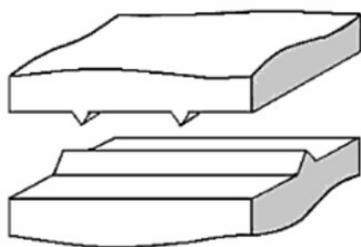
Hermetické spoje jsou snadněji dosažitelné u amorfních plastů než u semikrystalických. Pro těsný svar je důležité, aby svarové plochy byly perfektně rovné a co nejvíce navzájem rovnoběžné. Tupý spoj s usměrňovačem energie je vhodný pro amorfní plasty, protože jsou schopné toku taveniny a pozvolného tuhnutí. Pro semikrystalické plasty tento typ spoje není nejvhodnější, protože přemístěný materiál z usměrňovače obvykle tuhne dříve než je vytvořena těsnost napříč spojem. To má za následek snížení celkové pevnosti spoje a vytvoření těsnosti spoje je obtížně dosažitelné. Nicméně v některých případech je vlivem jistých omezení vynucených tvarem nebo velikostí dílu nezbytné užít pro díly ze semikrystalického plastu spoj s usměrňovačem energie. Usměrňovač by měl být větší a mít strmější úhel, aby byl vrchol usměrňovače špičatější. To způsobí částečné zamáčknutí vrcholu usměrňovače do styčné plochy protikusu v rané fázi svařování, čímž dojde k redukci množství předčasně ztuhlého materiálu a degradaci materiálu způsobeného jeho expozicí na vzduchu. Větší a špičatější tvar usměrňovače zlepšuje pevnost a zvyšuje šanci získat hermetický spoj. [10, s. 20] Zbylá mezera mezi svařenými díly v místě svaru by měla být osminou výšky usměrňovače energie (obr. 3.13) [17].

Graf na obr. 3.14 zobrazuje vliv tupého spoje s usměrňovačem energie a tupého spoje bez usměrňovače na proces svařování. Spoj s usměrňovačem potřebuje k natavení materiálu kratší čas a poskytuje také mnohem pevnější spoj oproti spoji bez usměrňovače energie. [3, s. 20]

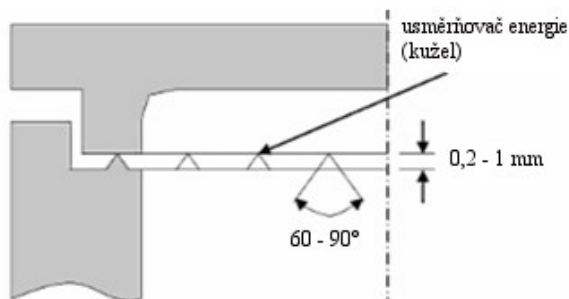


Obr. 3.14: Graf závislosti teploty na čase pro tupý spoj s usměrňovačem a bez usměrňovače energie [10, s. 21]

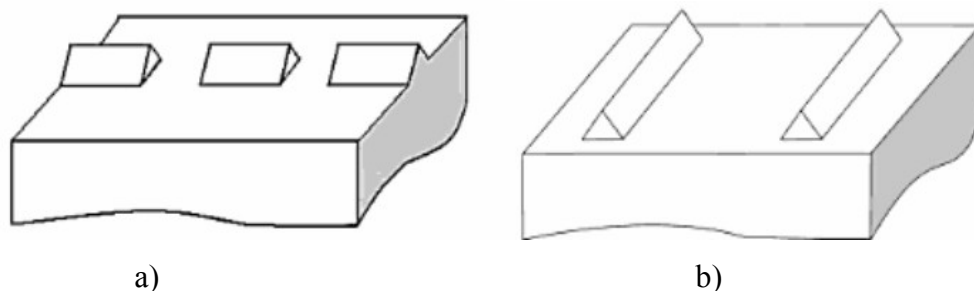
Existují různé konstrukční varianty užití spoje s usměrňovačem energie. U křížového spoje (obr. 3.15) jsou usměrňovače energie na obou spojovaných plochách a jsou navzájem kolmé. Toto uspořádání poskytuje minimální počáteční kontakt ve stykových plochách s potenciálně větším objemem materiálu, který je začleněn do svařování. Velikost takového usměrňovače energie by měla být 60% standardní velikosti usměrňovače. Kuželový tvar (obr. 3.16) redukuje celkovou plochu, která se bude svařovat a vyžaduje tedy méně energie a kratší svařovací čas. Požadavek minimálního generování tepla je důležitý při prevenci smrštění, ale má za následek nižší konstrukční pevnost. Přerušované usměrňovače energie (obr. 3.17 a) jsou užívány k redukcí celkové plochy svaru. Vyžadují méně energie a výsledkem jsou konstrukční svary. Usměrňovače energie mohou být také kolmé ke stěně (obr. 3.17 b), čímž se získá odolnost proti odlupujícím silám. [11, s. 28]



Obr. 3.15: Křížový usměrňovač energie [11, s. 28]



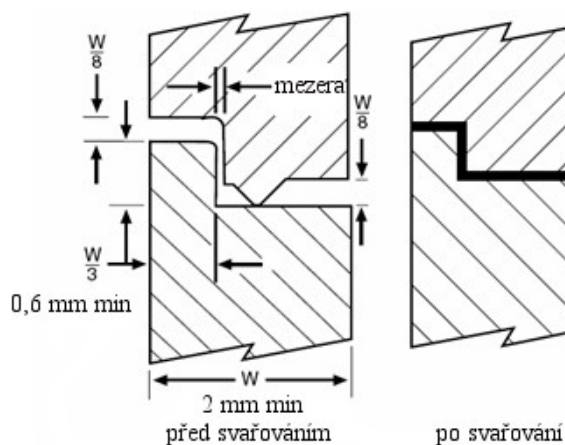
Obr. 3.16: Kuželový usměrňovač energie [11, s. 29]



Obr. 3.17: Usměrňovač energie - a) přerušovaný, b) kolmý ke stěně [11, s. 29]

Osazený spoj

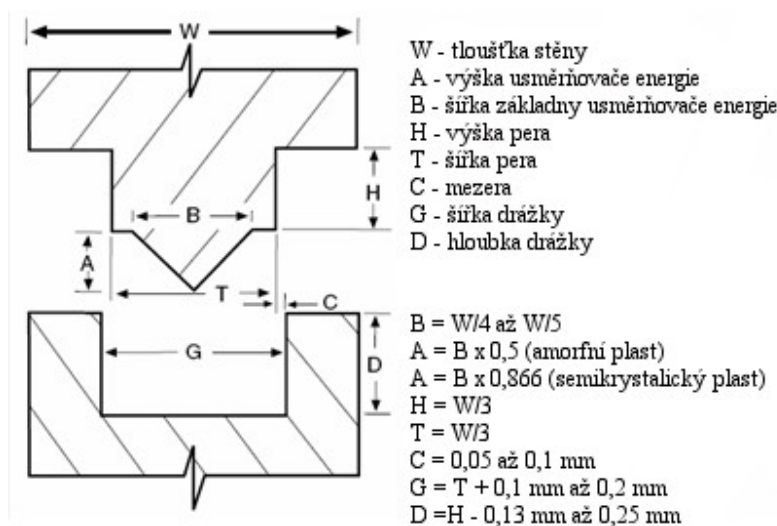
Jednou z variant spoje s usměrňovačem energie je osazený spoj (obr. 3.18), který poskytuje stejnoměrnou kontaktní plochu, minimální počáteční kontaktní plochu a vzájemnou polohu svařovaných dílů. U osazeného spoje je zahrnuta do svařování jen část stěny a proto je jeho pevnost nižší než pevnost tupého spoje s usměrňovačem energie. Doporučená minimální tloušťka stěny W je v rozmezí 2,03 - 2,29 mm. Osazený spoj může být použit pokud je důležitý kosmetický vzhled svaru. Tímto typem svaru může být eliminován výronek na vnější stranu svařence a vytvořen silný spoj, protože materiál z usměrňovače energie typicky teče do mezery mezi pero a osazením. Rozměry usměrňovače energie jsou identické s rozměry u tupého spoje. Výška a šířka pera je jednou třetinou tloušťky stěny W . Šířka drážky je o 0,05 až 0,1 mm větší než pera, aby nenastal přesah mezi díly. Hloubka drážky by měla být o 0,13 až 0,25 mm větší než výška pera, což zanechá mezi svařenými díly mezeru. Je to děláno ze vzhledových důvodů, aby nebyly vidět odchylky od rovinnosti ploch nebo nerovnoběžnost svařených dílů. [10, s. 21 - 22]



Obr. 3.18: Osazený spoj [10, s. 21]

Spoj pero - drážka

Spoj pero-drážka je další variantou spoje s usměrňovačem energie. Spoj zajišťuje stejnou kontaktní plochu, minimální počáteční kontaktní plochu a vzájemnou polohu dílů během svařování. Zabraňuje internímu i externímu výronku materiálu, protože přebytečný materiál je po obou stranách spoje zachycen v oblasti styčných ploch obou dílů (obr. 3.19). [10, s. 22]



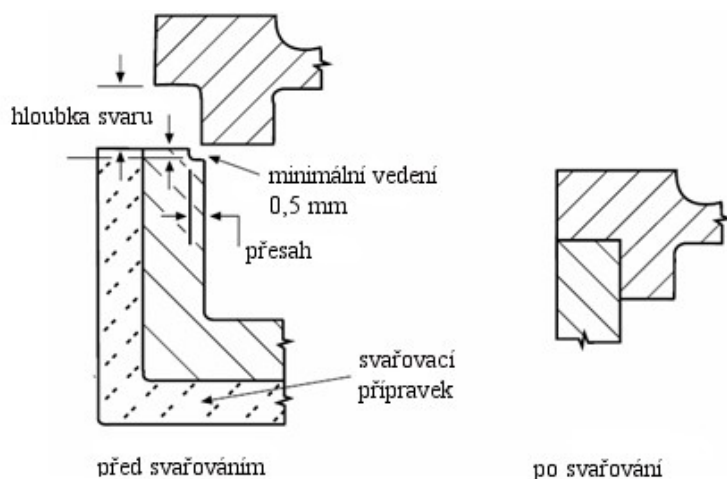
Obr. 3.19: Spoj pero - drážka [10, s. 22]

Spoj pero - drážka je užíván především pro aplikace, kde je důležité samostředění dílů a absence výronku materiálu ze spoje. Tento spoj je vynikající pro aplikace vyžadující hermetický spoj pro nízké tlaky. Hlavní nevýhodou spoje drážka - pero je jeho možná menší pevnost kvůli menší ploše ovlivněné spojením. Doporučená minimální tloušťka stěny u tohoto spoje je 3,05 mm až 3,12 mm. Rozměry usměrňovače energie jsou stejné jako pro tupý spoj. Výška a šířka pera jsou jednou třetinou tloušťky stěny. Na každé straně pera by měla zůstat mezera, aby nedošlo k přesahu mezi stěnami dílů a byl poskytnut prostor natavenému materiálu během svařování. Proto by měla být drážka o 0,1 až 0,2 mm širší než pero a hloubka drážky by měla být větší o 0,13 až 0,25 mm než výška pera. I zde je ponechána mezi svařenými díly malá mezera poskytující vzhledové výhody. [10, s. 23]

Střížný spoj

Střížný spoj (obr. 3.20) je užíván, když je vyžadován velmi těsný spoj (zvláště pro semikrystalické plasty). Tento spoj vyžaduje určitý přesah mezi díly ve stykových plochách. Svařování je započato tavením kontaktních ploch. Zasouvání dílů do sebe

umožňuje pokračování svařování s kontrolovaným přesahem podél svislých stěn. Může být také užit lapač výronku, který slouží k zachytávání materiálu vytlačeného ze svaru. Vzájemné promíchávání dvou natavených ploch na rozhraní svaru eliminuje netěsnosti, pórovitost, také expozici materiálu na vzduchu a předčasné tuhnutí. Promíchávání ploch produkuje silný konstrukční spoj. [10, s. 23 - 24]



obr. 3.20: Střížný spoj [10, s. 23]

U střížného spoje je důležitá pevná boční podpora k eliminaci deformace dílu během svařování. Stěny podpíraného dílu je třeba podepřít až k plochám rozhraní spoje prostřednictvím svařovacího přípravku, který by měl co nejvíce odpovídat tvaru dílu. Pro snadnější vyjmutí svařence by měl být přípravek dělený se snadným otevíráním a zavíráním. Střížný spoj poskytuje všechny tři základní požadavky na tvar spoje. Vedení poskytuje samostředění dílů a řádně navržené a vystříknuté díly zajišťují stejnoměrnou kontaktní plochu. Malá počáteční kontaktní plocha vzniká mezi díly ve spodu vedení. Na obr. 3.21 jsou uvedeny obecné doporučené hodnoty pro přesahy a tolerance dílů vztahené k maximálnímu rozměru dílu. Díly ze semikrystalických plastů užívající střížný spoj by neměly být v průměru větší než 88,9 mm. Díly z amorfních plastů mohou být větší. [10, s. 24]

průměr součásti	přesah na jedné straně (rozsah)	tolerance rozměru součásti
menší než 0.75" (18mm)	0.008" to 0.012" (0.2 to 0.3mm)	± 0.001" (± 0.025mm)
0.75" to 1.50" (18 to 35mm)	0.012" to 0.016" (0.3 to 0.4mm)	± 0.002" (± 0.050mm)
větší než 1.5" (35mm nebo větší)	0.016" to 0.020" (0.4 to 0.5mm)	± 0.003" (± 0.075mm)

minimální tloušťka stěny = 0.075" (1.8 mm)

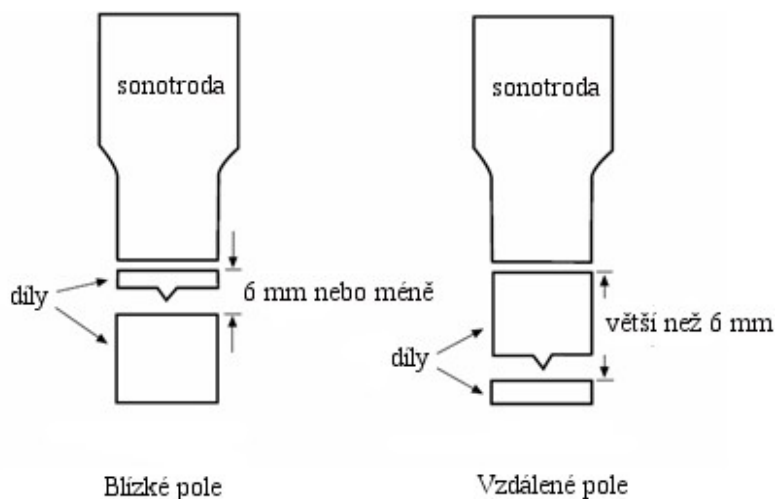
Obr. 3.21: Velikost přesahů střížného spoje [10, s. 24]

3.9 Tvar dílů

Kromě základního tvaru svarového spoje je nutné také brát v úvahu také tvar samotných svařovaných dílů. [10, s. 25]

3.9.1 Svařování v blízkém nebo vzdáleném poli

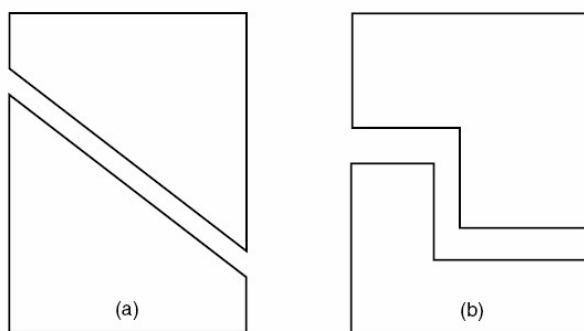
V mnoha aplikacích může být poloha spoje vůči pracovní ploše sonotrody kritickým faktorem, protože ultrazvuková energie musí cestovat skrz materiál, aby dosáhla požadované plochy tavení. Svařování ultrazvukem se podle vzdálenosti, po kterou je ultrazvuková energie přenášena z místa působení sonotrody do stykové plochy spoje, rozděluje na svařování v blízkém nebo vzdáleném poli (obr. 3.22). Pokud je tato vzdálenost rovna nebo menší než 6 mm, považuje se svařování za svařování v blízkém poli. Při vzdálenosti větší než 6 mm jde o svařování ve vzdáleném poli. Vždy je lepší svařovat v blízkém poli. Svařování ve vzdáleném poli vyžaduje vyšší amplitudu než je běžně užívaná, delší svařovací časy a vyšší přitlak sonotrody k dosažení porovnatelného svaru se svarem vytvořeným svařováním v blízkém poli. Svařování ve vzdáleném poli je doporučováno pouze pro amorfní plasty, které přenášejí energii lépe než semikrystalické plasty. [3, s. 25]



Obr. 3.22: Svařování v blízkém a vzdáleném poli [10, s. 25]

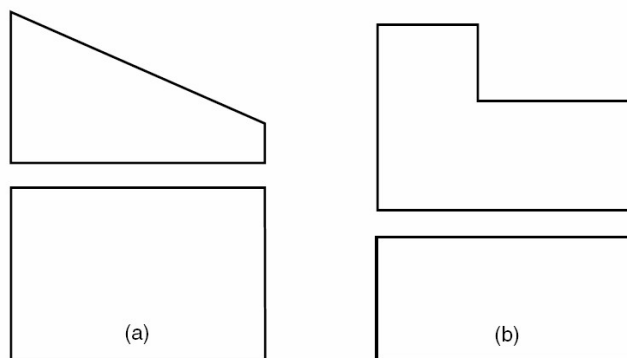
3.9.2 Svařovací rovina

Pro dosažení optimálního svaru je důležité, aby styčné svarové plochy ležely v jedné rovině, která je rovnoběžná s pracovní plochou sonotrody. To zajistí, že ultrazvuková energie urazí stejnou vzdálenost materiálem dílu do spoje. Ze stejného důvodu by měla pracovní plocha sonotrody také ležet v jedné rovině a být rovnoběžná s rovinou svaru. Na obr. 3.23 a 3.24 jsou zobrazeny nevhodné tvary svařovací roviny a kontaktní plochy dílu se sonotrodou, kde by energie musela urazit v různých místech svaru rozdílné vzdálenosti. To by mělo za následek nerovnoměrné zahřívání a tavení. Svařenec by byl nekonzistentní se slabými nebo převaženými spoji. [10, s. 26]



Obr 3.23: Nevhodná konstrukce svařovací roviny[10, s. 26]

- a) spoj v jedné svařovací rovině a nerovnoběžný k pracovní ploše sonotrody
- b) spoj rovnoběžný k pracovní rovině sonotrody, ale neležící v jedné rovině



Obr. 3.24: Nevhodný tvar kontaktní plochy dílu se sonotrodou [10, s. 27]

a) pracovní plocha sonotrody ležící v jedné rovině a nerovnoběžná s rovinou svaru

b) pracovní plocha sonotrody rovnoběžná k rovině svaru, ale neležící v jedné rovině

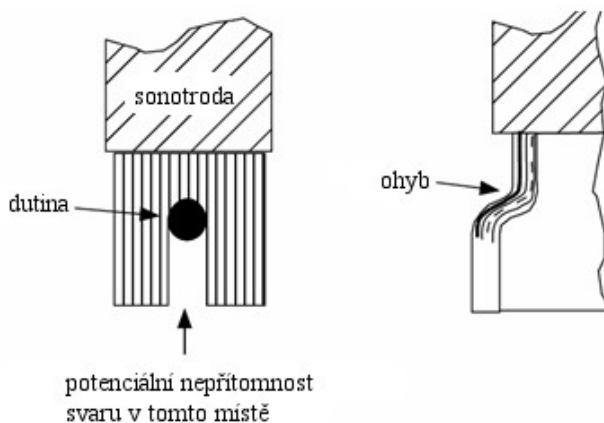
3.9.3 Další konstrukční kritéria

Ostré rohy

Ostré rohy koncentrují napětí a pokud je díl s ostrými rohy vystaven ultrazvukovým vibracím, tak může v těchto místech prasknout nebo se tavit. K redukci prasklin z napětí je doporučeno užít na všech rozích a hranách dostatečně velké rádiusy. [10, s. 27]

Otvory a dutiny

Energie necestuje dobře kolem otvorů, dutin, hran nebo zaoblení (obr. 3.25). Zda bude dosaženo přímo pod těmito místy svaru závisí na typu materiálu, velikosti otvoru, úhlu, atd. V případě možnosti by měly být všechny ostré úhly, zaoblení a otvory eliminovány. [10, s. 27]

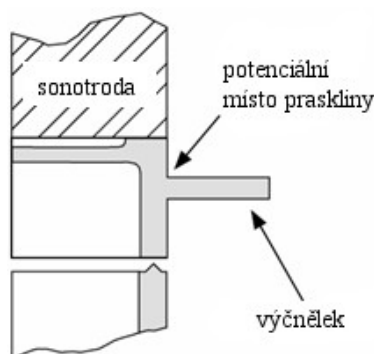


Obr. 3.25: Zásah do přenosu energie [17]

Výčnělky

Výčnělky, poutka a další vymodelované výstupky na plastovém díle také koncentrují napětí. Pokud je takový díl podroben vibrační energii, tak mají tyto útvary tendenci odpadnout (obr. 3.26). Cesta k minimalizaci porušení zahrnuje užití dostatečně velkých rádiusů v místech, kde jsou útvary připojeny k hlavní části dílu, užití malé síly působící na výčnělky pro utlumení jejich průhybu, navržení masivnějších výčnělků nebo použití zařízení pracující s frekvencí 40 kHz.

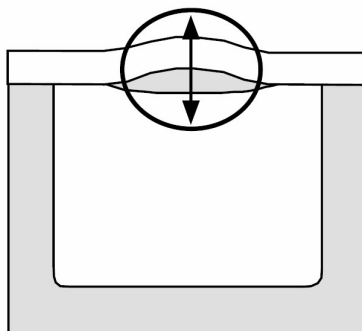
[10, s. 27 - 28]



Obr. 3.26: Detailní tvar ploch dílu [17]

Membránový efekt

Tenké členité, rovné, kruhové díly by se mohly ohýbat nebo podlehnout membránovému efektu působením vibrační energie. Kontakt sonotrody s právě takovým dílem by mohl způsobit ohýbání části dílu dolů a nahoru (obr. 3.27). Teplo z mohutného ohybu materiálu by mohlo způsobit natavení materiálu nebo vytavení otvoru ve stěně. Membránový efekt se bude často vyskytovat ve středu dílu nebo na vstupní ploše. Prevencí je v těchto místech vytváření silnějších stěn. [10, s. 28]



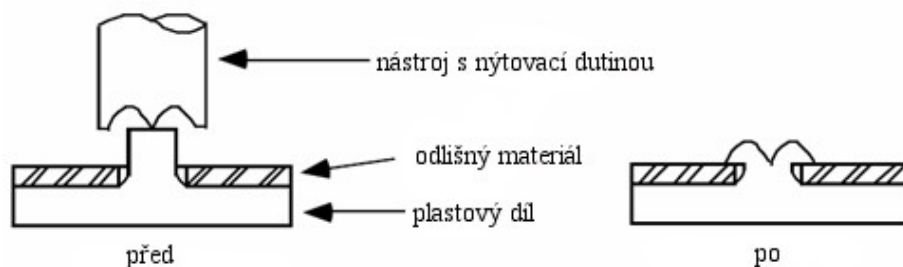
Obr. 3.27: Membránový efekt [17]

3.10 Ostatní techniky spojování pomocí ultrazvuku

Ultrazvukovou energii lze využít k mnoha dalším technikám spojování. Některé z nich jsou v této kapitole stručně nastíněny.

Nýtování

Nýtování je proces tavení a přetváření plastového dřívku na mechanický zámek (obr. 3.28). Tato metoda je vhodná pro spojování dílů z různých materiálů nebo je vyžadována jen jednoduchá vazba spojení, kde není nezbytná molekulární vazba. Vibrující sonotroda s tvarovým koncem se dotýká dřívku a vytváří lokalizované třecí teplo. Jak se dřívík natavuje, tak lehkým tlakem sonotrody dohází k vytváření hlavy na dřívku. Po ukončení vibrací natavený materiál tuhne a kovové či plastové díly jsou spojeny dohromady. Tvar hlavy nýtu je dán tvarem pracovní plochy sonotrody a může mít rozličný tvar, který je spojen vždy s určitými výhodami. [10, s. 29]



Obr. 3.28: Nýtování (standardní růžicový profil) [10, s. 29]

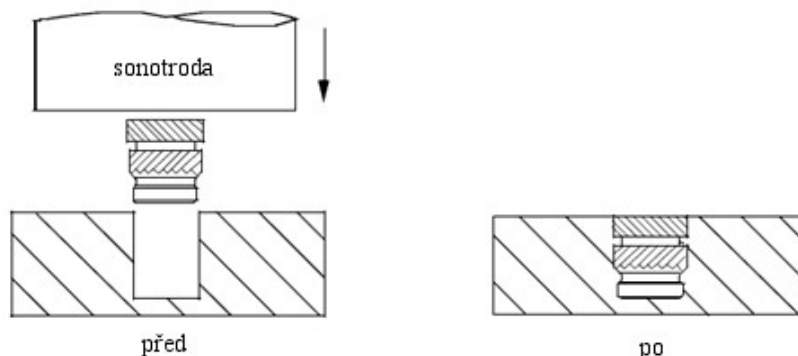
Přivařování kolíků

Alternativou k nýtování je přivařování kolíků, které lze užít pro spojování dílů z podobných materiálů na jednom nebo na více místech. Tuto techniku lze užít pokud výběr plastu, velikost nebo složitost dílu zabraňuje užití jiných technik spojování. Užívá se varianta střížného spoje, kde je kolík zaveden do otvoru a svar se vytvoří na obvodu kolíku a otvoru. [10, s. 33]

Zalisování

Zalisování je proces kotvení kovových dílů do předvstříknutých otvorů v plastovém díle, které jsou o něco málo menší než rozměr vkládané kovové vložky (obr. 3.29). Jakmile je na vložku aplikována ultrazvuková energie, tak dochází ke

generování třecího tepla vlivem vibrací vložky vůči plastovému dílu. Natavený plast dovoluje zalisovat vložku na dané místo. Vložka je pak obklopena nataveným plastem, který teče kolem vroubkování, žlábků a podebrání, které jsou na vložce. Ultrazvukové lisování kovových dílů spojuje vysokou pevnost konvenčně zastříkovaných vložek s výhodami zalisování dílů po vstřikování. [10, s. 34]



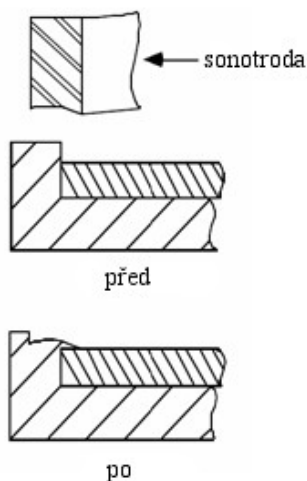
Obr. 3.29: Zalisování [10, s. 34]

Pěchování a tváření

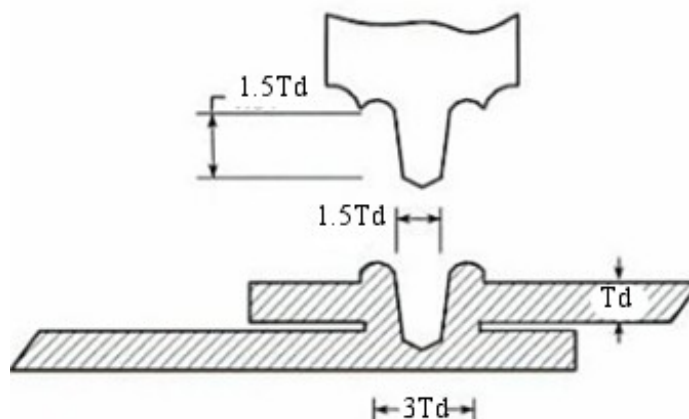
Pěchování je proces zachycení dalšího dílu sestavy pomocí natavení a tváření okraje plastového dílu (většinou vnější stěna). Tato technika spojuje díly bez molekulární vazby a pěchovaným materiálem je vždy termoplast (obr. 3.30). Připevňovaný díl je typicky z odlišného materiálu (např. sklo). Výhodou této metody je přiléhavost dílů sestavy, rychlý cyklus a eliminace upínacích prvků nebo lepidel. Pěchování i tváření vyžaduje speciální nástroj a je nutné brát v úvahu vlastnosti použitých materiálů. [10, s. 35 - 36]

Bodové svařování

Bodové svařování (obr. 3.31) spojuje dva plastové díly v lokalizovaných bodech bez předtvářeného otvoru nebo usměrňovače energie. Tato metoda produkuje silný svar a je vhodná pro velké díly, desky, vytlačované nebo lité termoplasty a díly s komplikovanou geometrií nebo s těžko přístupnými plochami. Speciálně tvarovaný hrot sonotrody se protaví skrz horní vrstvu termoplastu a částečně vstupuje do druhé vrstvy. Svar vzniká ve stykové ploše mezi dvěma deskami. Spodní svařovaná deska má v místě spoje hladký vzhled a vrchní deska má kolem spoje viditelný prstenec. Bodové svařování je rychlým procesem spojování nevyžadující extra upínací prvky a obecně ani speciální přípravky. [10, s. 37]



Obr. 3.30: Pěchování



Obr. 3.31: Řez bodovým svarem [18, s.169]

 T_d -tloušťka horní vrstvy termoplastu

Odstranění vtokové soustavy

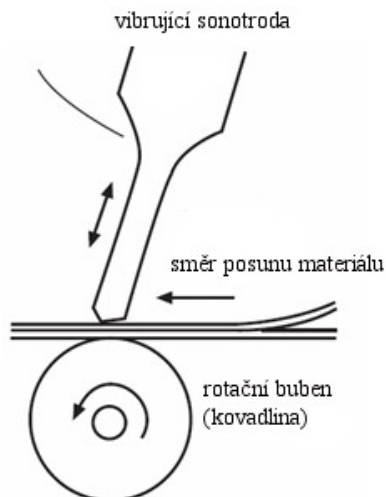
Ultrazvukovou technikou je možné separovat od vstřikovaných dílů jejich vtokový systém. Tato metoda pracuje nejlépe u tuhých termoplastů. Výhodami je rychlost operace, nízké napětí v dílech a čistá plocha v místě odstranění vtokové soustavy. [10, s. 38]

Kontinuální svařování

Při kontinuální ultrazvukovém svařování jsou ploché díly dopravovány vysokou rychlostí pod stacionární sonotrodu nebo rotační sonotrodu a přípravek. Proces je vhodný pro tuhé termoplastické díly, které mají alespoň jednu rovnou plochu pro kontakt se sonotrodou. Metodu lze aplikovat i na látky a fólie. Mohou být svařovány velké i malé díly a měl by být užit tvar spoje pro tuhé termoplasty se středícími prvky. [10, s. 38]

Spojování textilií

Ultrazvukové spojování textilií spojuje dvě nebo více vrstev netkaných materiálů během jejich průchodu mezi vibrující sonotrodou a rotačním bubnem (obr 3.32). Rotační buben je obvykle vyroben z oceli a má na povrchu výstupky, kde dochází ke spojování materiálů, což dává spojeným materiálům vysoký stupeň měkkosti, prodyšnosti a absorpce.



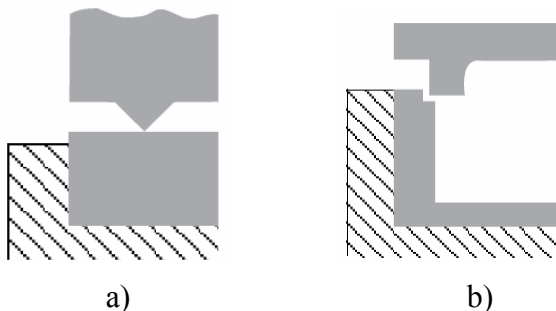
Obr. 3.32: Ultrazvukové spojování textilií [3, s. 39]

Řezání textilií

Ultrazvukové řezání poskytuje dělenému materiálu z termoplastu zatavené hrany, což chrání tkané látky před rozpletením a poskytuje hladké hrany. Zkosené hrany zabraňují nárůstu rolování materiálu. Dvě nebo více vrstev tkaných nebo netkaných textilií může být řezáno a nataveno dohromady. [10, s. 39]

3.11 Svařovací přípravek

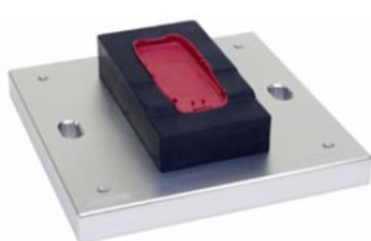
Svařovací přípravek musí zajistit polohu dílů pod sonotrodou tak, aby proces svařování byl opakovatelný a musí zajistit řádnou podporu místa svaru pro účinné přivedení ultrazvukové energie do svarových ploch k zajištění kvalitního svaru. Přípravek by měl podporovat spoj s usměrňovačem energie až pod styčnou plochu spoje (obr. 3.33 a) a u střížného spoje by měl plně podporovat spojovací plochy k eliminaci deformace bočních stěn (obr. 3.33 b). [10, s. 62]



Obr. 3.33: Podpora svařovaných dílů [10, s. 62]

a) podpora dílu s usměrňovačem energie; b) podpora dílu se střížným spojem

Přípravky jsou navrhovány dle požadavků konkrétní aplikace. Pružný přípravek (obr. 3.34 a) se typicky užívá pro díly z tuhých amorfních termoplastů s usměřňovačem energie. Je vyroben z odlévaného polyuretanu, který má elastické vlastnosti, což minimalizuje proznačení svařovaných dílů. Náklady na jeho výrobu jsou nižší než u tuhého přípravku, ale pohlcuje více energie. Tuhý přípravek (obr. 3.34 b) je užíván pro díly z pružných termoplastů s usměřňovačem energie nebo střížným spojem. Užívá se pro všechny semikrystalické termoplasty. Měl by být také užit pro operace zalisování, nýtování, přechování nebo bodové svařování. Vhodným materiálem pro jeho výrobu je hliník nebo nerezová ocel. [10, s. 62 - 63]



a)



b)

Obr. 3.34: Ukázka přípravků s vloženými svařovanými díly

a) pružný přípravek; b) tuhý přípravek [10, s. 63]

4. Experimentální část

4.1 Popis experimentu

Experimentální část disertační práce se zabývá vlivem obsahu nanojílového plniva v polypropylenové matrici na pevnost svarového spoje vytvořeného ultrazvukovým svařováním za různých podmínek svařování. Svařování se provádělo při změně vybraných hlavních svařovacích parametrů ve vhodném rozsahu, což mělo zajistit pokrytí optimálních podmínek svařování a zároveň poskytnout přehled o vlivu změn svařovacích parametrů na pevnost svaru. Důvodem pro svařování při různých podmínkách byla nedostupnost optimálních hodnot svařovacích parametrů, které závisí na svařovaném materiálu, typu spoje, jeho geometrii a velikosti. Navíc se svařoval semikrystalický plast, u kterého se rozsah amplitudy a svařovací síly pro dosažení kvalitního svaru nachází ve velmi úzkém pásmu. Při ultrazvukovém svařování jsou svařované díly náchylné na proznačení a proto se zjišťovalo jejich poškození od svařovacího nástroje. Bylo také nutné zjistit vliv koncentrace nanojílu na pevnost plastu prostřednictvím tahové zkoušky, protože pevnost svaru souvisí s pevností svařovaného materiálu.

Pro svařování byl vybrán spoj s usměřňovačem energie, který byl implementován na jedno zkušební tělísko v celé jeho šířce. Vstřikovaná zkušební tělíska byla volena jednoduchého tvaru s ohledem na možnost upnutí do čelistí běžného zkušebního zařízení, kde byla po svaření podrobena destrukční zkoušce. Pevnost svarového spoje se hodnotila prostřednictvím destrukční síly. Destrukční sílu lze definovat jako maximální sílu, které již není svarový spoj schopen odolat.

Z důvodu snadné deformace špičky usměřňovače byla volena metoda svařování na absolutní vzdálenost a byl zjišťován vliv koncentrace nanojílu na rozměry zkušebních tělísek v oblasti svarových ploch vstřikovaných při neměnných podmínkách. Vyladit vstřikovací proces pro získání stejných rozměrů dílů při různé koncentraci nanojílu by bylo velice náročné a omezené možnostmi zařízení katedry. Svařovací zařízení umožňovalo sbírat data o poloze sonotrody během svařování, což bylo využito ke zjišťování vhodnosti metody svařování na relativní vzdálenost pro díly s vysokým usměřňovačem energie z houževnatého plastu.

Vzhledem k vysokému útlumu ultrazvukových kmitů v polypropyleny jsou díly z něj svařitelné pouze v blízkém poli s obecně udávanou dobrou až obtížnou svařitelností. Geometrie svařovaných tělísek byla zvolena tak, aby se ultrazvukové vibrace šířily na počátku svařování po dráze menší než je limitní hodnota pro svařování v blízkém poli, ale zároveň byla svařovaná tělíska vhodná pro zkoušení pevnosti svaru na běžných zkušebních zařízeních. V úvahu byl brán předpoklad, že s narůstající vzdáleností, kterou budou muset vibrace urazit, se bude vliv nanojílu výrazněji projevovat oproti neplněnému materiálu. Ověřovala se také vhodnost tvaru zkušebních tělísek pro svařování a velikost vůle uložení tělísek v přípravku.

Přehled uskutečněných kroků v experimentu:

- volba vstřikovaného materiálu (matrice, plnivo –nanoblend koncentrát, koncentrace plniva v matrici)
- výpal nanoblend koncentráту
- návrh geometrie zkušebních tělísek
- návrh a výroba vstřikovací formy
- volba technologických parametrů vstřikování a vstřikování tělísek
- návrh a výroba svařovacího přípravku
- zkracování zkušebních tělísek před svařováním
- vstřikování zkušebních těles pro tahovou zkoušku
- stanovení tahových vlastností svařovaných materiálů
- měření rozměrů zkušebních tělísek v oblasti svarových ploch
- stanovení metod a technologických parametrů svařování
- zjišťování vlivu změny rozměrů tělísek mezi neplněným a plněným PP na svařovací proces a pevnost svarového spoje při metodě svařování na absolutní vzdálenost
- svařování tělísek s různou koncentrací nanojílu za různých podmínek svařování
- stanovení a vyhodnocení pevnosti svarového spoje svařených tělísek a dalších snímaných veličin
- vyhodnocení poškození svařovaných tělísek od svařovacího nástroje
- ověření vhodnosti tvaru zkušebních tělísek pro svařování ultrazvukem

- zjištění vlivu podélné vůle uložení tělísek ve svařovacím přípravku na pevnost svarového spoje

Pro statistickou analýzu dat byly použity statistické programy Minitab a Statistica. Pro statistické hypotézy byla užitá hladina významnosti 0,05. Bylo předpokládáno, že naměřená data jsou z normálního rozložení. Porovnávaly se i skupiny s neshodnými rozptyly, což mohlo vést k nižší validitě výsledků. Literární zdroje popisující podmínky užití porovnávacích statistických metod nejsou v této oblasti jednotné.

Podmínky skladování tělísek, svařování a měření byly následující:
teplota 23 ± 2 °C, relativní vlhkost $45 \pm 5\%$.

4.2 Vstřikovaný materiál

Materiál matrice a plniva bylo nutné vybírat s ohledem na použitou technologii zpracování plastu (vstřikování) a vzájemnou kompatibilitu.

4.2.1 Plnivo

Za plnivo byl zvolen exfoliovaný montmorillonitický nanojíl rozptýlený v nosném homopolymerním polypropylenovém nosiči, který je dodáván ve formě granulátu firmou PolyOne pod názvem Nanoblend concentrate 1001. Koncentrát je snadno dostupný a zpracovatelný na běžně užívaných vstřikovacích lisech. Koncentrát obsahuje 40 hmotnostních procent nanojílu s tolerancí $\pm 2\%$.

Výrobce uváděné rozměry exfoliovaných nanojílových destiček jsou 200nm - 600 nm - 1 nm [19]. Hlavní hodnoty mechanických a tepelných vlastností PP-H nosiče s různým procentem nanojílu jsou uvedeny v příloze 1. Přírůstek fyzikálních vlastností plastů plněných nanojílem lze pokládat za kompletní přibližně po sedmi dnech [20].

Granulát koncentráту byl podroben výpalu, aby se zjistilo skutečné množství nanojílu v dané šarži. Výpal se prováděl při různých teplotách v rozsahu 450 °C až 600 °C a zjištěná hmotnostní procenta nanojílu jsou uvedena v příloze 1. Spalování za nižších teplot než 450 °C nebylo užito, protože by se polypropylenová složka

nespálila beze zbytku. Zjištěná hmotnostní procenta nanojílu byla pod rozsahem 38 - 42%, který udává výrobce. Pravděpodobně při výpalu došlo k rozkladu nanojílu a k jeho částečnému spálení. Bylo tedy uvažováno 40 hmotnostních procent nanojílu v koncentrátu.

4.2.2 Materiál matrice

Za materiál matrice byl vybrán homopolymerní polypropylen Mosten GB 005, který je semikrystalickým víceúčelovým termoplastem se střední distribucí molekulových hmotností a základní aditivací. Je určen pro vstřikování, výrobu tkacích pásků, provazů a motouzů a pro výrobu fólií s následným tvarováním. [21]

Výběr matrice byl podmíněn vhodnou tekutostí plastu vzhledem ke geometrii dutin vstřikovací formy a možností užití pro technické díly. Přehled základních vlastností polypropylenu Mosten GB 005 je uveden v příloze 1.

4.2.3 Stanovení koncentrace plniva v matrici

Pro experiment byly zvoleny následující tři hladiny hmotnostního procenta nanojílového plniva v polypropylenové matrici pro pokrytí běžně užívaného rozsahu:

- 2% nanojílu (5% nanoblend koncentrátu + 95% polypropylenu)
- 4% nanojílu (10% nanoblend koncentrátu + 90% polypropylenu)
- 6% nanojílu (15% nanoblend koncentrátu + 85% polypropylenu)

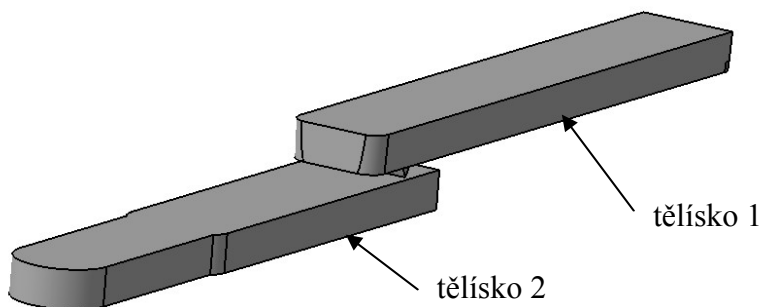
4.3. Návrh geometrie zkušebních tělísek

Tvar zkušebních tělísek byl volen jednoduchý s ohledem na možnosti vstřikování na katedře a upnutí svařence v čelistech běžného zkušebního zařízení. Tělíska tvaru tyčinek se svařovala v přeplátované poloze, což umožnilo snadné upnutí svařence do čelistí zkušebního zařízení s vypodložením pomocnými vložkami, tak aby se eliminovalo přesazení svařených dílů. Tloušťka tělísek a výška usměrňovače energie byla volena s ohledem na podmínku svařování v blízkém poli z důvodu nadmolekulární struktury polypropylenu a doporučenou geometrii usměrňovače energie. Také se bral ohled na dostatečnou robustnost tělísek potřebnou pro zkoušení

na běžných zkušebních zařízeních. Užitý svarový spoj je vlastně tupý spoj s usměrňovačem energie, který byl vhodným řešením pro spojení navržených tělísek.

4.3.1 Tvar a velikost zkušebních tělísek

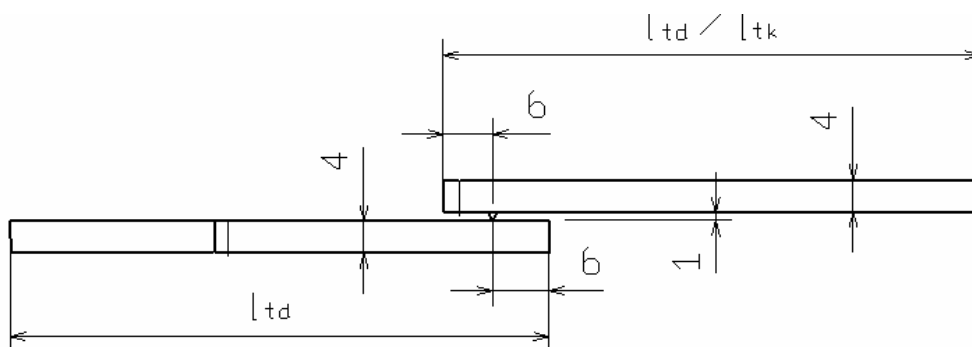
Poloha tělísek před svařováním je zobrazena na (obr. 4.1). Tělísko 1 opatřené usměrňovačem energie mělo lichoběžníkový průřez s délkou kratší základny 10 mm, do které byl integrován usměrňovač energie o výšce 1 mm. Zkosení bočních stěn bylo 2° a tloušťka tělíska 4 mm. Tělísko 2 bez usměrňovače mělo v místě svaru obdélníkový průřez o rozměrech 11,2 mm x 4 mm. Tělísko 2 bylo voleno širší oproti tělísku 1 o 1,2 mm, aby v přeplátované poloze nedocházelo během svařování k vybočení tělíska 1 mimo tělísko 2 (obr. 4.2), což by mělo vliv na pevnost svaru. Širším tělískem 2 se eliminoval vliv vůle uložení tělísek ve svařovacím přípravku a tato konstrukce také dovolovala vodícím prvkům svařovacího přípravku vytvářet boční podporu tělísku 2 až do místa svarových ploch a případný výronek nataveného materiálu z místa svaru měl dostatek volného prostoru, což eliminovalo možné problémy s vyjímáním svařence. Na obr. 4.3 je zobrazena skica tělísek v pozici před svařováním s okótovanou vzájemnou polohou.



Obr. 4.1: Pozice přeplátovaných tělísek před svařováním



Obr. 4.2: Zobrazení příčného rozšíření tělíska 2 oproti tělísku 1

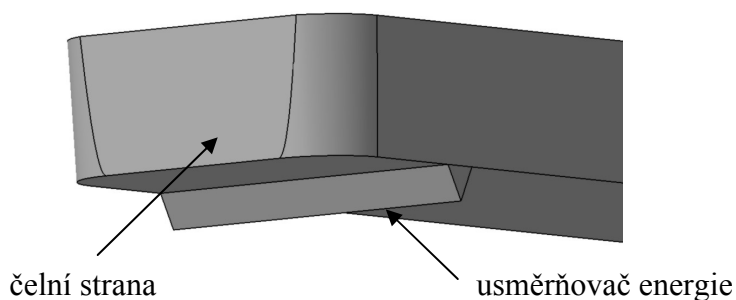


Obr. 4.3: Skica s rozměry a vzájemnou polohou svařovaných tělísek

l_{td} - délka dlouhého zkušebního tělíska 1, 2; l_{tk} - délka krátkého zkušebního tělíska 1

4.3.2 Usměrňovač energie

Po celé šířce tělíska 1 byl integrován usměrňovač energie pro semikrystalické plasty o profilu rovnostranného trojúhelníku o teoretické výšce 1 mm volené z doporučeného rozsahu 0,22 - 1,1 mm pro zajištění dostatečného množství materiálu k vytvoření spoje na plochách, kde se dopředu očekávaly vlivem větší tloušťky dílů větší propady od smrštění materiálu. Čelní strana tělíska 1 (obr. 4.4), která byla v kontaktu s vodícím prvkem svařovacího přípravku, byla navržena bez zkosení pro eliminaci horizontálního posuvu tělíska 1 během svařování.



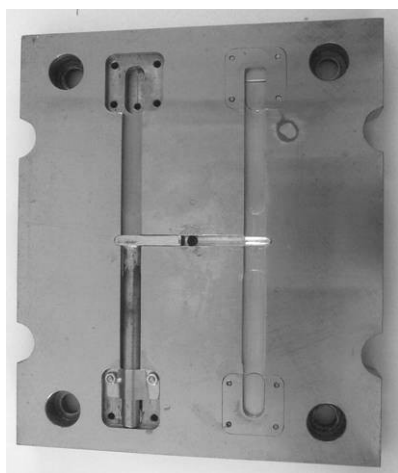
Obr. 4.4: Tělísko 1- zobrazena část tělíska s usměrňovačem energie

4.5 Vstřikování zkušebních tělísek

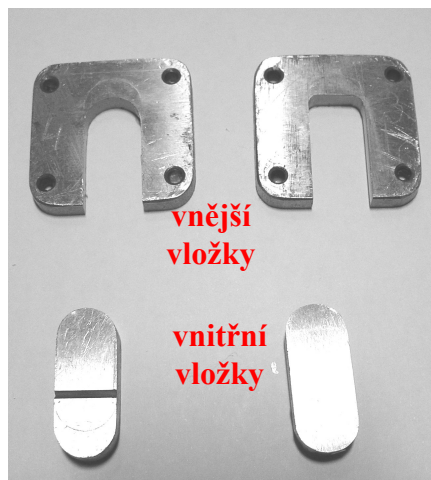
4.5.1 Vstřikovací forma

Pro vstřikování zkušebních tělísek byla navržena čtyřnásobná forma s centrálním vyhazovačem (obr. 4.5) a vyměnitelnými vnitřními a vnějšími vložkami (obr. 4.6).

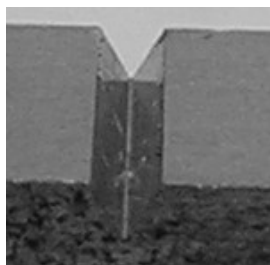
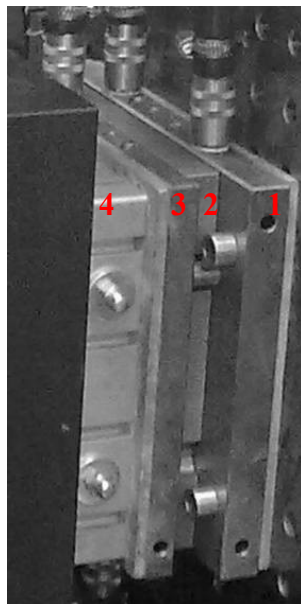
Požadovaná geometrie usměrňovače energie na tělísku se získala prostřednictvím vrubu na vnitřní vložce, který na ni byl zhotoven pomocí elektrojiskrového obrábění (obr. 4.7), což zajistilo velice malý rádius na špičce usměrňovače. Konstrukce a přesnost formy byly omezeny možnostmi katedry. Pro vstřikování byly užity pouze dvě dutiny a zbylé dvě byly deaktivovány pomocí vložky v rozváděcím kanálu.



Obr. 4.5: Vstřikovací forma



Obr. 4.6: Užité vložky

Obr. 4.7: Detail vrubu na
vložce o hloubce 1 mm

Obr. 4.8: Sestava vstřikovací formy

- 1 - rovinná polovina vstřikovací formy
- 2 - polovina vstřikovací formy s dutinami
- 3 - temperační deska
- 4 - rozpěrný blok

Sestava formy (obr. 4.8) obsahovala jednu polovinu formy rovinnou a druhou s tvarovými dutinami, která neměla vlastní temperační kanály a byla proto upnuta na temperační desce, která byla vedena pomocí kolíků ve vodících otvorech rovinné poloviny formy. Temperační deska byla upevněna na rozpěrném bloku, aby bylo možno formu uzavřít, protože upínací desky použitého lisu nebylo možno k sobě zcela přiblížit.

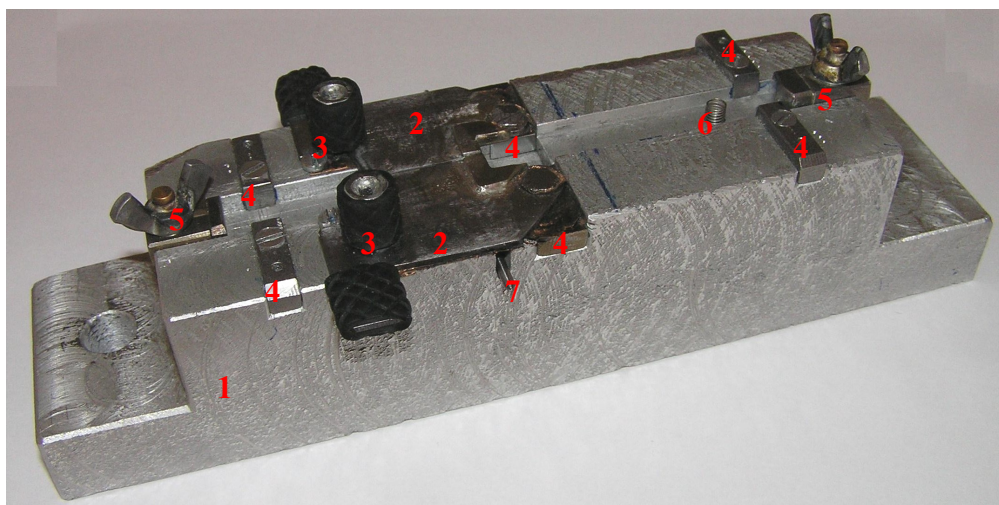
4.5.2 Technologické parametry vstřikování

Vstřikování zkušebních tělísek i těles pro tahovou zkoušku bylo prováděno na vstřikovacím lisu Engel Victory 80/25 Tech. Vstřikovací parametry byly nastaveny tak, aby docházelo k co nejmenším propadlinám a zároveň nenastala degradace materiálu s ohledem na možnosti formy. Míchání granulátu koncentrátu a matrice probíhalo ručně. Pro jejich odvažování byla užita digitální váha AND GF-300-EC s přesností měření 0,001 g. Sušení koncentrátu není vyžadováno, ale protože byl uskladněn s PP matricí v prostředí s vyšší relativní vlhkostí, byl granulát sušen po dobu 1 - 3 h při 80 °C.

Vstřikování zkušebních tělísek pro všechny koncentrace plniva probíhalo při shodných parametrech vstřikování s ohledem na doporučené hodnoty udávané výrobcem koncentrátu [20]. Pro nanojíl je limitující teplota 230 °C a při jejím překročení dochází k jeho degradaci. Byly nastaveny následující parametry vstřikování: teplota formy 60 °C; teplota na trysce 215 °C; teplota předního pásma 210 °C; teplota středního pásma 204 °C; teplota zadního pásma 180 °C; teplota pod násypkou 30°C, maximální nastavená vstřikovací rychlost 80 mm/s, zpětný tlak do 7 bar; otáčky šneku při plastikaci do 100 min⁻¹; maximální naměřený tlak hydrauliky při vstřikování 30 bar, doba dotlaku 18 s; dotlak 29 bar; doba chlazení 25 s. Při vstřikování těles pro zkoušku tahem došlo k přenastavení vstřikovaného objemu, zvýšení uzavírací síly a polštáře.

4.6 Návrh svařovacího přípravku

Svařovací přípravek (obr. 4.9) sloužil k zajištění vzájemné polohy svařovaných tělísek během svařování. Materiál masivního těla přípravku byl volen ze slitiny hliníku. Tělísko 2 bez usměrňovače energie s příčným rozšířením bylo ukládáno do hlubší drážky přípravku s vůlí v příčném směru 0,1 - 0,15 mm. Přípravek mu poskytl řádnou boční podporu až k plochám svaru. Tělísko 1 s usměrňovačem energie se volně pokládalo ve vertikálním směru na tělísko 2 a bylo v přípravku uloženo v příčném směru s vůlí 0,1 - 0,15 mm. Příčné vůle byly nastaveny broušením pevných příčných vodících prvků a kontrolovány spárovými měrkami na náhodném výběru tělísek v sériích 0% až 6%. Hodnoty příčné vůle byly převzaty ze spoje pero - drážka. Vůle uložení tělísek v jejich podélném směru byla nastavitelná pomocí stavitelných podélných vodících prvků dle potřeby. Plochy vodících prvků z oceli 11600 byly leštěny.



Obr. 4.9: Svařovací přípravek

- 1 - tělo přípravku se dvěma otvory pro upnutí k základně svařovacího zařízení;
- 2 - vodící otevíratelná ramena; 3 - aretace ramen; 4 - pevné příčné vodící prvky;
- 5 - stavitelné podélné vodící prvky; 6 - pružinka ; 7 – ruční vyhazovač

Do přípravku se jako první vložilo tělísko 2, poté došlo k zavření a aretaci vodících otevíratelných ramen. Následovalo vložení tělíska 1, které se v místě svaru opíralo o tělísko 2 prostřednictvím usměrňovače energie a na druhé straně bylo podpíráno pružinkou s nízkou tuhostí, což zajišťovalo tělísku 1 horizontální polohu

(obr. 4.10). Toto uložení tělíska 1 umožnilo dosáhnout vzájemné rovnoběžné polohy kontaktní plochy tělíska 1 s pracovní plochou sonotrody, což bylo důležité pro přenos ultrazvukové energie. Horizontální poloha tělíska 1 se nastavila změnou výšky vložky pod pružinkou, která byla uložena na dně otvoru v přípravku. Po ukončení svařování zůstal svařenec v přípravku a stlačená pružinka působila na tělísko 1 zanedbatelnou silou. K snadnému vyjmutí svařence z přípravku bez silového působení na vytvořený svar sloužil ruční vyhazovač.

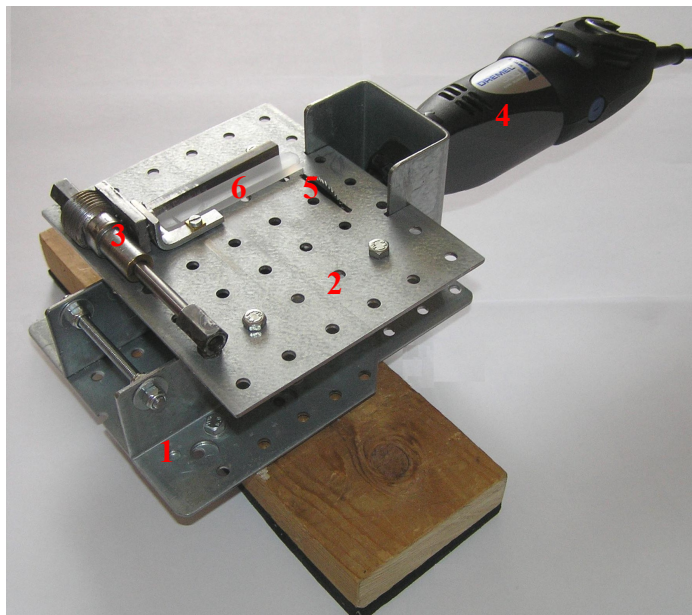


Obr. 4.10: Svařovací přípravek s vloženými svařovanými zkušebními tělíska

4.7 Úprava zkušebních tělísek před svařováním

Vstříkovaná tělíska bylo nutné po odstranění vtokového systému zakrátit s dostatečnou přesností, aby nebylo nutné přeseřizovat stavitelné podélné vodící prvky na svařovacím přípravku a zároveň byly tělíska ve svařovacím přípravku uloženy s vhodnou podélnou vůlí. Pro zakracování tělísek byl navržen a zhotoven řezací přípravek s přesným vedením ramene a řezacím kotoučem o průměru 32 mm, který byl poháněn vysokootáčkovým elektromotorem (obr. 4.11). Pro svařování byly použity dvě verze tělísek 1 a to dlouhá a krátká. Tělíska 2 byly užity pouze v dlouhé verzi. Změřená a vypočítaná střední hodnota délky tělísek 1 po zakrácení v dlouhé verzi byla $\bar{x}_{l_{td}} = 65,27$ mm a naměřené rozměry se od střední hodnoty pohybovaly v rozsahu + 0,15 mm až -0,17 mm. U krátkých tělísek 1 byla zjištěna střední hodnota délky $\bar{x}_{l_{tk}} = 21,72$ mm a naměřené rozměry se od střední hodnoty pohybovaly v rozsahu + 0,10 mm až - 0,10 mm. Menší rozsah naměřených hodnot pro krátké

tělísko byl pravděpodobně způsoben menším počtem měřených tělísek. Posuvným měřítkem Mitutoyo CD-15CPx.se měřilo 50 náhodně vybraných zakrácených dlouhých tělísek 1 a 21 krátkých tělísek, protože jich více nebylo svařováno. Naměřená data jsou uvedena v příloze 2.



Obr 4.11: Řezací přípravek s připraveným tělískem na řezání

1 - hlavní nosná ocelová konstrukce; 2 - pracovní deska; 3 - vedení s posuvným členem, do kterého se vkládaly řezané díly; 4 - vysokootáčkový motor s upínacími kleštinami; 5 - pilový kotouč na upínacím trnu; 6 - řezané tělísko

4.8. Stanovení tahových vlastností svařovaných materiálů

Vliv procenta nanojílu na pevnost plněného polypropyleny se zjišťoval prostřednictvím tahových zkoušek podle normy ČSN EN ISO 527-1, 2.

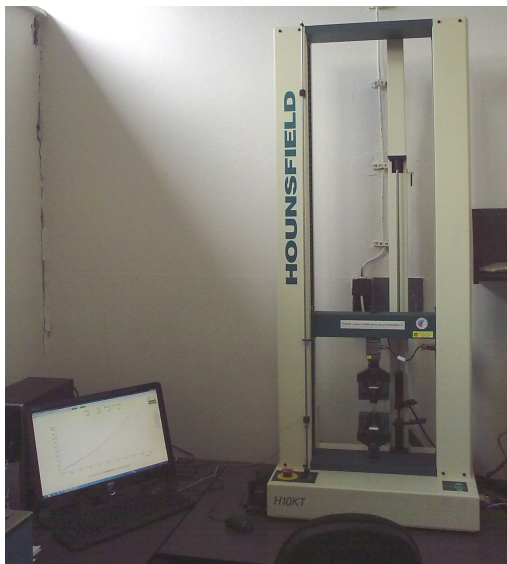
Parametry zkoušky:

- vstřikovaná zkušební tělesa typu 1B (obr. 4.12)
- počet testovaných zkušebních těles pro každou koncentraci -15 kusů
- zkušební zařízení Hounsfield H10KT se snímačem 10 kN a softwarem Qmat (obr. 4.13)
- na průtahoměru nastavena počáteční měřená délka $L_0 = 50 \pm 0,5$ mm
- počáteční vzdálenost čelistí $L = 115$ mm

- tělesa ponechána 30 dní v prostředí laboratoře při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti $45 \pm 5\%$
- rychlost zkoušení volena 20 mm/min
- podélná osa zkušebních těles shodná s osou zkušebního zařízení
- měření rozměrů průřezu zkušebních těles na třech místech



Obr. 4.12: Zkušební tělesa
1B pro zkoušku tahem
(0%, 2% ,4%, 6% nanojílů)



Obr. 4.13: Zkušební zařízení
Hounsfield H10KT se softwarem
Qmat instalovaným v počítači

Výstupem ze zkoušek byly křivky závislosti síly F na prodloužení ΔL_0 , které byly přepočítány na křivky závislosti napětí v tahu σ (4.1) na poměrném prodloužení ε (4.3), které jsou uvedeny v příloze 3. Pro hodnocení sérií bylo použito meze pevnosti v tahu σ_M a vyhodnotilo se i poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu ε_M a při přetržení ε_B .

$$\sigma = F / S_0 \quad (4.1)$$

$$S_0 = h \cdot b_l \quad (4.2)$$

$$\varepsilon = 100 \cdot \Delta L_0 / L_0 \quad (4.3)$$

kde je:

σ ... napětí v tahu [MPa]

F ... měřená síla [N]

S_0 ... plocha počátečního příčného průřezu zkušebního tělesa [mm²]

h ... tloušťka zkušebního tělesa na délce L_0 [mm]

b_1 ... šířka zkušební tělesa na délce L_0 [mm]

ε ... poměrné prodloužení [%]

L_0 ... počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm]

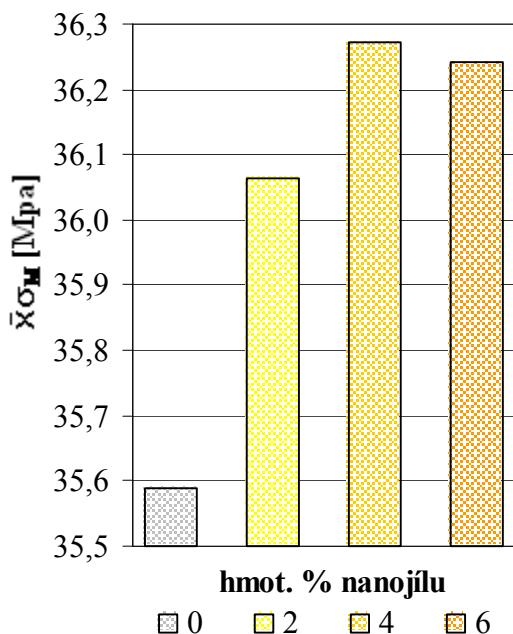
ΔL_0 ... prodloužení tělesa na délce L_0 [mm]

4.8.1 Zpracovaná naměřená data

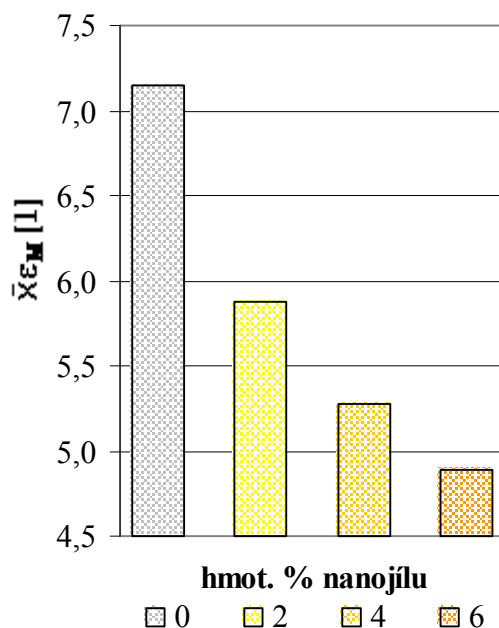
Protože byla zkušební tělesa vstřikována, tak bylo v dané sérii vždy změřeno jen jedno zkušební těleso na třech místech (místa na koncích a uprostřed délky L_0) a naměřené rozměry byly užity pro výpočet střední hodnoty plochy průřezu zkušební tělesa pro danou sérii \bar{X}_{S_0} (uvedeno v příloze 3), která byla použita pro výpočet napětí v tahu podle vzorce 4.1. Napětí na mezi pevnosti a poměrné prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení jsou pro jednotlivé vzorky uvedeny v příloze 3.

Tab. 4.1: Střední hodnoty napětí na mezi pevnosti, poměrného prodloužení na mezi pevnosti a při přetržení pro koncentrace nanojílu 0 až 6%

	hmot. % nanojílu											
	0			2			4			6		
	σ_M [MPa]	ε_M [%]	ε_B [%]	σ_M [MPa]	ε_M [%]	ε_B [%]	σ_M [MPa]	ε_M [%]	ε_B [%]	σ_M [MPa]	ε_M [%]	ε_B [%]
\bar{X}	35,6	7,1	606,3	36,1	5,9	129,7	36,3	5,3	69,9	36,2	4,9	26,0
s	0,5	0,2	141,0	0,2	0,4	45,4	0,2	0,3	27,3	0,2	0,4	13,2
x_{\max}	36,0	7,4	870,0	36,3	6,7	219,5	36,6	5,7	102,6	36,5	5,6	64,4
x_{\min}	34,5	6,4	168,8	35,7	5,1	68,6	35,8	4,5	22,0	35,7	4,4	13,1
Δ	1,5	1,0	701,2	0,6	1,6	150,9	0,7	1,2	80,6	0,8	1,2	51,3



Obr. 4.14: Střední hodnoty meze pevnosti v tahu pro jednotlivé série



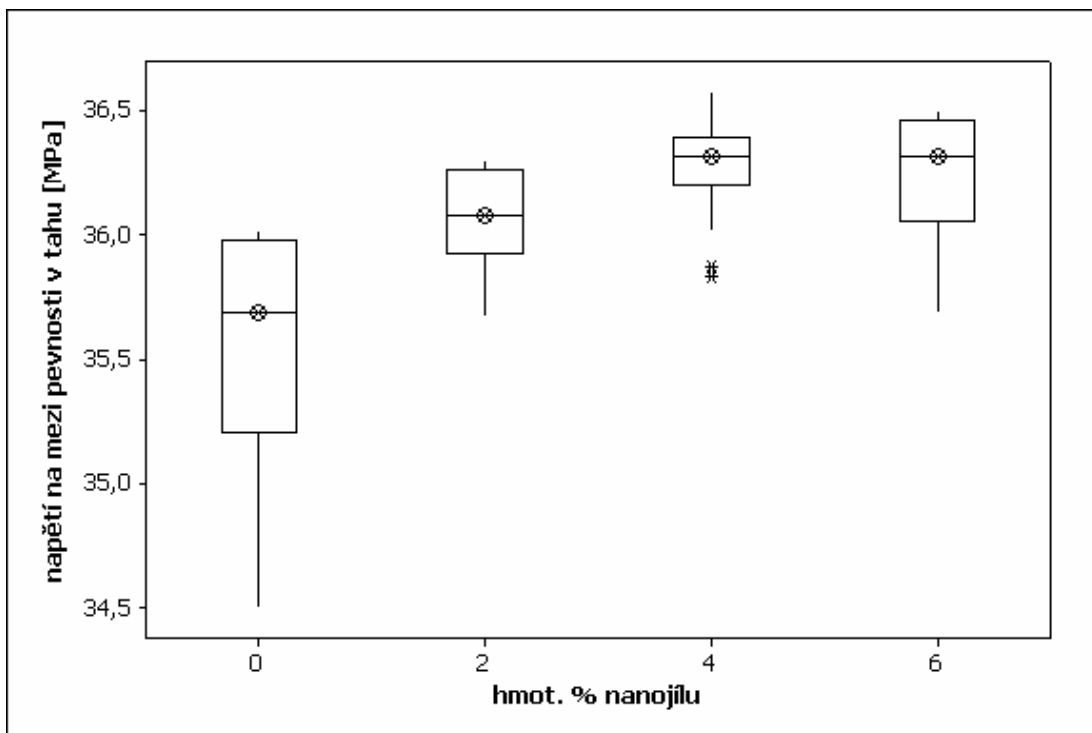
Obr. 4.15: Střední hodnoty poměrného prodloužení na mezi pevnosti v tahu pro jednotlivé série

4.8.2 Vyhodnocení

Mez Pevnosti v tahu σ_M

Pro neplněný polypropylen byla zjištěna střední hodnota napětí na mezi pevnosti v tahu $\bar{\sigma}_M$, resp. napětí na mezi kluzu $\bar{\sigma}_y$ 35,6 MPa. Přidáním 2% nanojílu vzrostla na 36,1 MPa, při 4% se zvýšila na 36,3 MPa a při 6% dosáhla 36,2 MPa (obr.4.14). Největší výběrová směrodatná odchylka byla spočítána pro neplněný polypropylen a to $s_{\sigma_M} = 0,5$ MPa, pro plněné série se zjistila odchylka 0,2 MPa.

Podle testu normality Anderson-Darling jsou data v sériích 2% (p-hodnota = 0,159) a 6% (p-hodnota = 0,152) normální. U série 0% (p-hodnota = 0,015) a 4% (p-hodnota = 0,013) se normalita zamítá. Leveneho test vykázal shodnost rozptylů mezi sériemi (p-hodnota = 0,070). Kruskal-Wallisův test zjistil významnou odlišnost mezi sériemi (p-hodnota = 0). Podle obecné metody mnohonásobného porovnávání se série 0% rovná sérii 2% a série 2%, 4%, 6% jsou si mezi sebou rovný. Tomu nasvědčuje i krabicový graf (obr. 4.16).

Obr. 4.16: Krabicové grafy σ_M pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75 % percentil, \otimes značka střední hodnoty

Poměrné prodloužení ε

Střední hodnota poměrného prodloužení na mezi pevnosti \bar{X}_{ε_M} , resp. na mezi kluzu \bar{X}_{ε_y} , s rostoucím procentem nanojílů klesá od hodnoty 7,1% pro neplněný polypropylen až na hodnotu 4,9% pro plněný polypropylen s 6% nanojílů (obr. 4.15). Výběrová směrodatná odchylka se pohybuje do 0,4 %. S procentem nanojílů výrazně klesá střední hodnota poměrného prodloužení při přetržení \bar{X}_{ε_B} . U neplněného polypropyleny je 606,3%, pro 2% nanojílů je 129,7%, pro 4% nanojílů je 69,9% a pro 6% nanojílů je 26%. Výběrová směrodatná odchylka poměrného prodloužení při přetržení s_{ε_B} je značně vysoká.

4.8.3 Dílčí diskuze výsledků

Přidáním nanojílového koncentráту do polypropyleny došlo k nárůstu střední hodnoty napětí na mezi pevnosti do 0,7 MPa. Nárůst pevnosti je ovlivněn nejen samotným nanojílem, ale také jeho nosičem, který má větší pevnost než plněný materiál. Statistická analýza vyhodnotila, že série 0% = 2% a 2% = 4% = 6%.

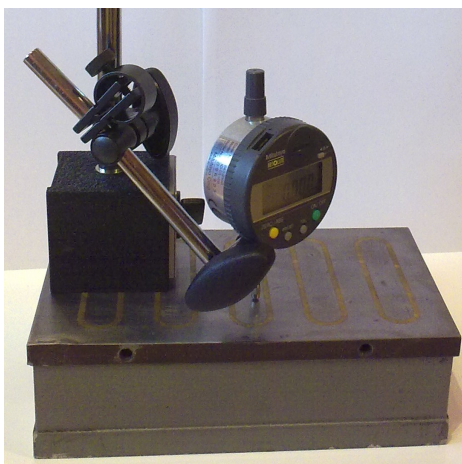
Zvyšování koncentrace nanojílů má výrazný snižující účinek na poměrné prodloužení.

4.9 Měření tloušťky zkušebních tělísek

Měření tloušťky zkušebních tělísek v oblasti svarových ploch se provádělo pro zjištění vlivu obsahu nanojílů na tloušťku tělísek při shodných technologických parametrech vstřikování, pro nastavení vhodné výšky svařence a pro ověření stability tloušťky tělísek dané vstřikovacím procesem.

4.9.1 Měřicí pomůcky

Pro měření byl užit digitální úchylkoměr Mitutoyo ID-C112B a stojánek s magnetickým upínáním, který byl upnut na magnetickém upínači obrobků (obr. 4.17). Vzájemné pozice prvků měřicí sestavy nebyly během měření měněny a dodržovala se shodná orientace měřených tělísek vzhledem k desce magnetického upínače.

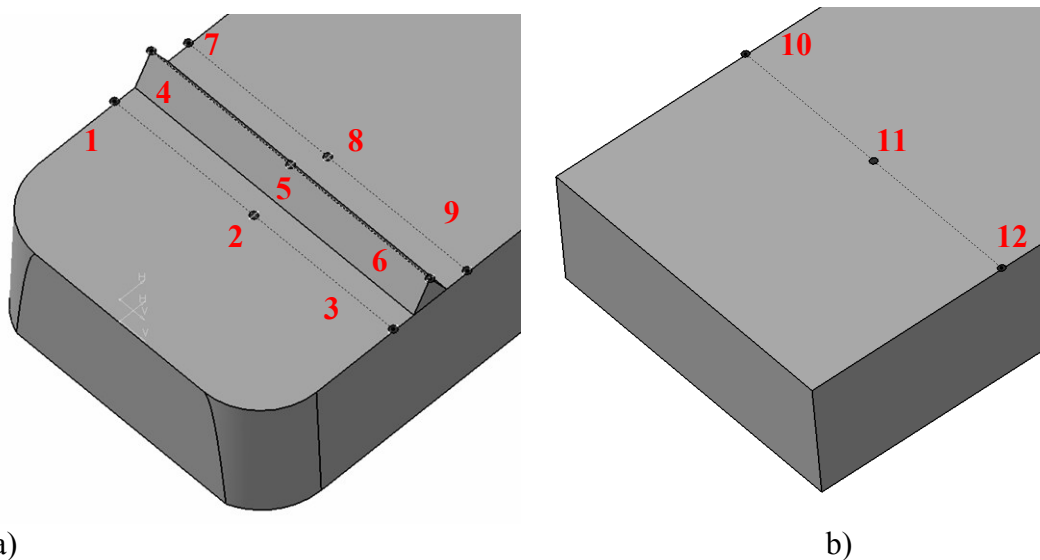


Obr. 4.17: Sestava úchylkoměru, magnetického stojánku a magnetického upínače

Pomocí koncových měrek byla nastavena kolmost osy měřicí části úchylkoměru k ploše magnetického upínače ve dvou na sebe kolmých rovinách. Označení míst měření bylo provedeno pomocí zhotovených šablonek z hliníkového plechu a lihového popisovače s tenkým seříznutým hrotem.

4.9.2 Místa měření

Na tělísku 1 byly vybrány tři místa na špičce usměrňovače energie a šest ve vzdálenosti 1,3 mm od paty usměrňovače (obr. 4.18 a). Vzdálenost 1,3 mm byla minimální možná s ohledem na měřicí část úchylkoměru. Na tělísku 2 byla vybrána místa měření na okrajích (místo 10 a 12), v jeho ose (místo 11) a na protilehlé straně k místu 11 (místo 13) (obr. 4.18 b). Místa měření na tělísku 2 ležela v teoretické rovině dotyku vrcholu usměrňovače, tj. 6 mm od čela tělíska 2. Měření tloušťky v místech 10 a 12 na širším tělísku 2 bylo vybráno pro zjednodušení. Měření v místech na tělísku 2, která by odpovídala místům měření 4 a 6 na tělísku 1, by bylo kvůli propadu plochy vlivem smrštění a kulové měřicí plochy úchylkoměru obtížné a nepřesné.



Obr. 4.18: Místa měření - a) na tělísku 1; b) na tělísku 2

- místa měření 1, 2, 3, 7, 8, 9 vzdálená 1,3 mm od paty usměrňovače
- místa měření 10, 11, 12 vzdálená 6 mm od čela tělíska 2
- místo měření 13 na tělísku 2 nezobrazeno (na straně protilehlé k místu měření 11)

4.9.3 Zpracované naměřené hodnoty

Měření probíhalo na deseti náhodně vybraných vzorcích pro každou sérii (0%, 2%, 4%, 6% nanojílu) a každé místo se desetkrát opakovaně měřilo pro zmenšení nejistoty. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 4. Z opakovaných měření v měřených místech se vypočítaly střední hodnoty tloušťky \bar{X}_t a z těchto středních

hodnot se vypočítaly jejich střední hodnoty \bar{X}_t a výběrové směrodatné odchylky S_t (viz. tab. 4.2 a tab. 4.3). U naměřených dat z míst 1, 3, 7, 9 se vyhodnocovaly pouze maximální naměřené hodnoty \bar{X}_t pro výpočet nastavení teoretické výšky svařence. V místech 1, 3, 7, 9 se objevoval malý výronek způsobený nedokonalým vyvložkováním dutiny formy, který se ořezával ručně skalpelem. Statistická analýza v těchto místech by pozbývala smyslu. Měření na vrcholu usměrňovače v místech 4, 5, 6 bylo ovlivněné snadnou deformovatelností špičky usměrňovače, čemuž odpovídá i rozkolísanost naměřených dat.

Tab. 4.2: Tloušťka tělíska 1 v místech měření 1 až 9

hmot. % nanojílu		\bar{x}_{t1} [mm]	\bar{x}_{t2} [mm]	\bar{x}_{t3} [mm]	\bar{x}_{t4} [mm]	\bar{x}_{t5} [mm]	\bar{x}_{t6} [mm]	\bar{x}_{t7} [mm]	\bar{x}_{t8} [mm]	\bar{x}_{t9} [mm]
0	\bar{X}	4,005	3,903	4,005	5,016	4,949	5,027	4,053	3,929	4,047
	S	0,012	0,008	0,007	0,025	0,010	0,033	0,017	0,011	0,006
	\bar{x}_{max}	4,027	3,916	4,014	5,079	4,963	5,083	4,084	3,943	4,056
	\bar{x}_{min}	3,987	3,891	3,995	4,986	4,932	4,956	4,031	3,913	4,040
	Δ	0,040	0,025	0,019	0,093	0,031	0,127	0,054	0,030	0,016
2	\bar{X}	4,003	3,874	4,002	5,019	4,922	5,024	4,078	3,884	4,039
	S	0,012	0,008	0,006	0,043	0,009	0,019	0,030	0,009	0,006
	\bar{x}_{max}	4,027	3,892	4,016	5,074	4,942	5,068	4,133	3,899	4,049
	\bar{x}_{min}	3,987	3,865	3,995	4,926	4,910	4,997	4,043	3,868	4,032
	Δ	0,040	0,027	0,020	0,148	0,031	0,070	0,090	0,030	0,017
4	\bar{X}	3,999	3,867	4,007	5,008	4,909	5,001	4,055	3,881	4,044
	S	0,007	0,005	0,010	0,023	0,009	0,041	0,017	0,007	0,011
	\bar{x}_{max}	4,012	3,876	4,026	5,043	4,923	5,038	4,082	3,897	4,062
	\bar{x}_{min}	3,992	3,859	3,992	4,968	4,895	4,919	4,034	3,870	4,020
	Δ	0,021	0,017	0,033	0,075	0,028	0,119	0,049	0,027	0,042
6	\bar{X}	4,002	3,863	4,002	4,994	4,911	5,002	4,072	3,876	4,042
	S	0,014	0,012	0,014	0,021	0,017	0,038	0,041	0,012	0,012
	\bar{x}_{max}	4,033	3,879	4,038	5,029	4,939	5,044	4,152	3,897	4,072
	\bar{x}_{min}	3,986	3,842	3,990	4,964	4,894	4,942	4,022	3,857	4,025
	Δ	0,047	0,037	0,048	0,065	0,045	0,102	0,130	0,041	0,047

Tab. 4.3: Tloušťka tělíska 2 v místech měření 10 až 13

hmot. % nanojílu		\bar{x}_{t10} [mm]	\bar{x}_{t11} [mm]	\bar{x}_{t12} [mm]	\bar{x}_{t13} [mm]	hmot. % nanojílu		\bar{x}_{t10} [mm]	\bar{x}_{t11} [mm]	\bar{x}_{t12} [mm]	\bar{x}_{t13} [mm]
0	\bar{X}	3,964	3,876	3,967	3,911	4	\bar{X}	3,961	3,846	3,962	3,886
	S	0,003	0,003	0,003	0,004		S	0,002	0,006	0,003	0,005
	\bar{x}_{max}	3,969	3,882	3,971	3,920		\bar{x}_{max}	3,963	3,856	3,967	3,893
	\bar{x}_{min}	3,958	3,874	3,960	3,908		\bar{x}_{min}	3,959	3,835	3,955	3,878
	Δ	0,011	0,008	0,011	0,012		Δ	0,004	0,021	0,012	0,015
2	\bar{X}	3,959	3,845	3,961	3,890	6	\bar{X}	3,955	3,839	3,962	3,890
	S	0,005	0,005	0,003	0,008		S	0,001	0,003	0,003	0,007
	\bar{x}_{max}	3,971	3,853	3,965	3,905		\bar{x}_{max}	3,957	3,845	3,965	3,901
	\bar{x}_{min}	3,953	3,838	3,955	3,881		\bar{x}_{min}	3,953	3,835	3,957	3,880
	Δ	0,017	0,015	0,010	0,024		Δ	0,004	0,010	0,008	0,021

4.9.4 Vyhodnocení tloušťky tělísek pro nastavení výšky svařence

Protože byla vybrána metoda svařování na absolutní vzdálenost, tak bylo nutné zjistit jaké největší tloušťky tělísek 1 a 2 lze očekávat v místech svarových ploch a podle toho vypočítat a nastavit výšku svařence zadávanou do řídicí jednotky svařečky. Důvodem byla eliminace kontaktu mezi tělísky během svařování mimo oblast usměrňovače energie, aby nedošlo k ovlivnění pevnosti svaru a tedy i k ovlivnění vyhodnocení naměřených dat. Z tabulek 4.2 a 4.3 se převzaly do tabulky 4.4 maximální hodnoty \bar{x}_t pro místa měření 1, 3, 7, 9, 10, 12 pro všechny koncentrace nanojílu.

Tab. 4.4: Maximální střední hodnoty tloušťky v místech 1, 3, 7, 9, 10, 12

hmot. % nanojílu	tělísko 1			tělísko 2		
	\bar{x}_{t1max} [mm]	\bar{x}_{t3max} [mm]	\bar{x}_{t7max} [mm]	\bar{x}_{t9max} [mm]	\bar{x}_{t10max} [mm]	\bar{x}_{t12max} [mm]
0	4,027	4,014	4,084	4,056	3,969	3,971
2	4,027	4,016	4,133	4,049	3,971	3,965
4	4,012	4,026	4,082	4,062	3,963	3,967
6	4,033	4,038	4,152	4,072	3,957	3,965

- červeně zobrazeny maximální hodnoty \bar{x}_{tmax} ze všech měření pro jednotlivá tělíska

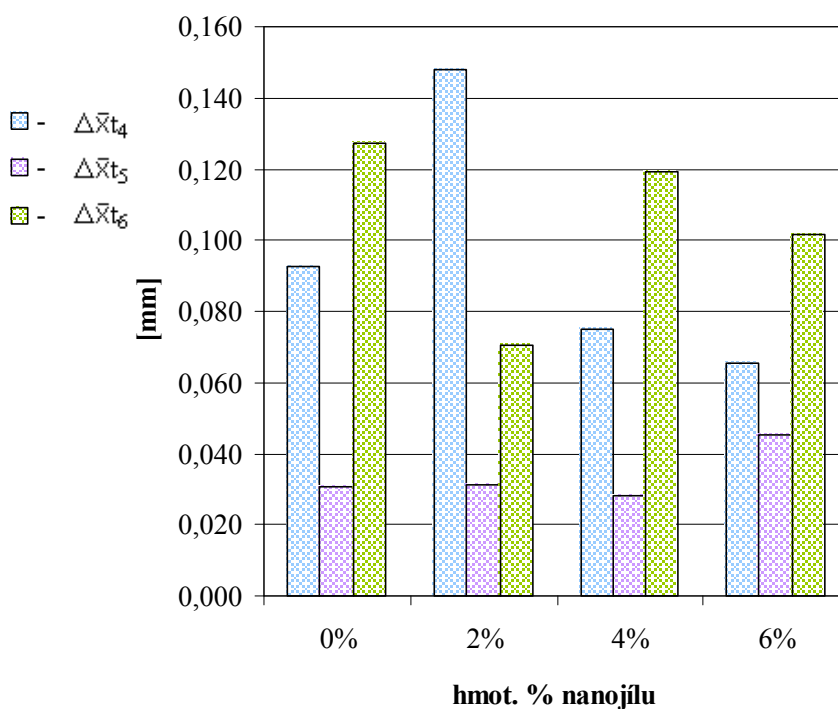
Největší hodnoty \bar{x}_{tmax} ze všech měření pro tělísko 1 a 2 se zobrazily v tab. 4.4 červeně. Protože se na měřených hranách tělíska 1 ořezával přetok, tak se počítalo

s největšími hodnotami $\bar{x}_{t_{\max}}$ u obou tělísek bez ohledu na koncentraci nanojílu. Maximální střední hodnota tloušťky byla pro tělísko 1 označena jako $\bar{x}_{t_{\max 1}} = 4,152$ mm a pro tělísko 2 jako $\bar{x}_{t_{\max 2}} = 3,971$ mm. Obě hodnoty byly použity při výpočtu teoretické výšky svařence v kapitole 4.11.

4.9.5 Vyhodnocení vlivu koncentrace nanojílu na tloušťku tělíska 1

Místa měření 4, 5, 6

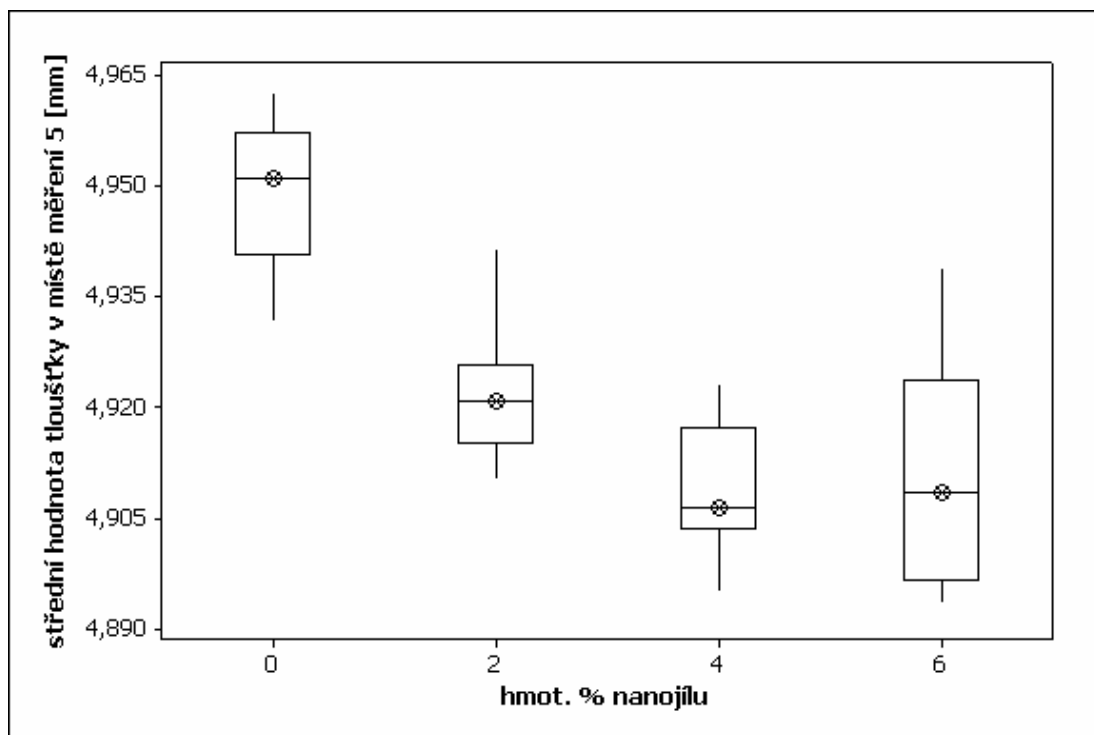
Špička usměrňovače byla ostrá, což v kombinaci s houževnatým plastem vedlo k její snadné deformovatelnosti při vyjímání z dutiny formy a také v průběhu měření. Rozdíl Δ mezi maximální a minimální \bar{x}_t v místech 4, 5, 6 pro všechny série se pohyboval od 28 μm do 148 μm (viz. tab. 4.2) a je graficky zobrazen na obr. 4.19.



Obr. 4.19: Rozdíl $\Delta \bar{x}_t$ v místech měření 4, 5, 6 (na usměrňovači energie)

Větší výkyvy střední hodnoty tloušťky na krajích usměrňovače než v jeho střední části byly způsobeny větší náchylností v těchto místech k deformaci při odformovávání a samotném měření. Střední část usměrňovače byla vlivem smrštění oproti koncům propadlá a tedy i méně náchylná na deformace při odformování.

Statistická analýza střední hodnoty tloušťky tělíska se provedla pouze pro místo měření 5 a prokázala normalitu dat podle Anderson-Darlinga (pro 0% p-hodnota = 0,627; pro 2% p-hodnota = 0,518; pro 4% p-hodnota = 0,118, pro 6% p-hodnota = 0,195) a shodnost rozptylů podle Bartletta (p-hodnota = 0,158). Anova prokázala významnou odlišnost mezi skupinami (p-hodnota = 0) a podle T-metody mnohonásobného porovnávání se série 0% liší od všech plněných sérií, které se mezi sebou vzájemně významně statisticky neodlišují, což je vidět i na krabicových grafech (obr. 4.20).



Obr. 4.20: Krabicové grafy \bar{X}_{t_5} pro jednotlivé série

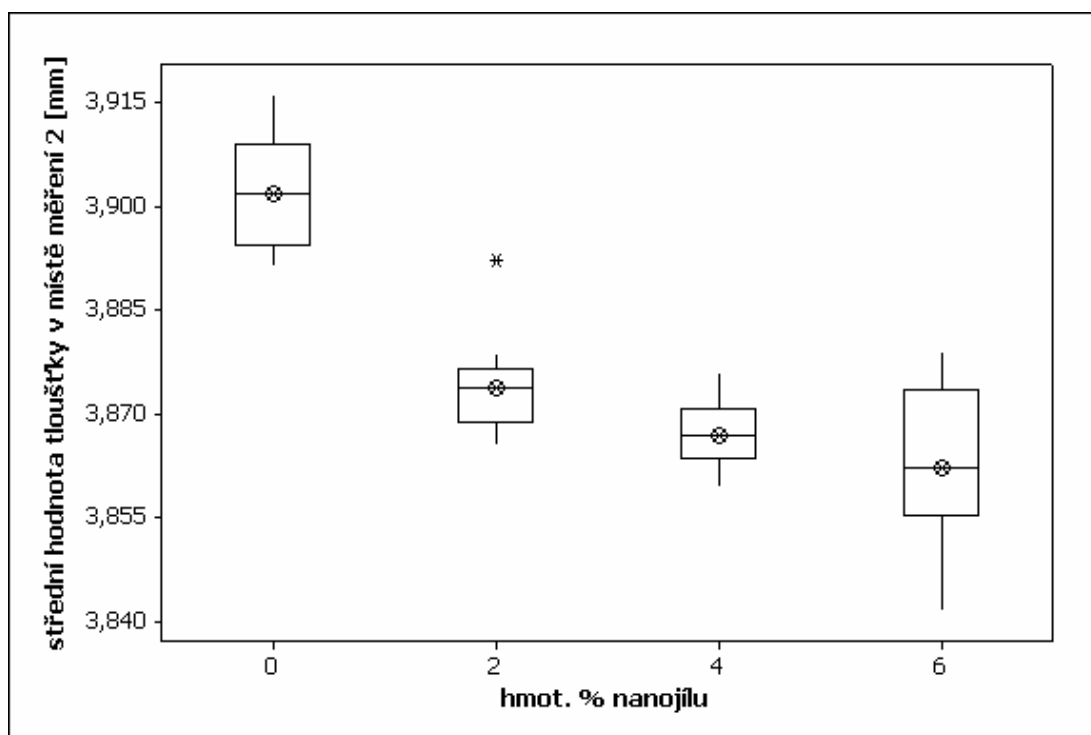
* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, ⊗ značka střední hodnoty

Místa měření 2, 8

Z krabicových grafů na obr. 4.21 a 4.22 je patrné, že střední hodnota tloušťky tělísek pro neplněný polypropylen v místech 2 a 8 je vyšší než pro plněné série s rozdílem v řádu desítek mikrometrů. T-metoda zjistila pro \bar{X}_{t_2} odlišnost série 0% od všech plněných sérií, shodnost série 2% a 4% a shodnost série 4% a 6%. Pro \bar{X}_{t_8} T-metoda zjistila statisticky významnou odlišnost série 0% od všech plněných sérií, které se mezi sebou neodlišují. (viz. tab. 4.5)

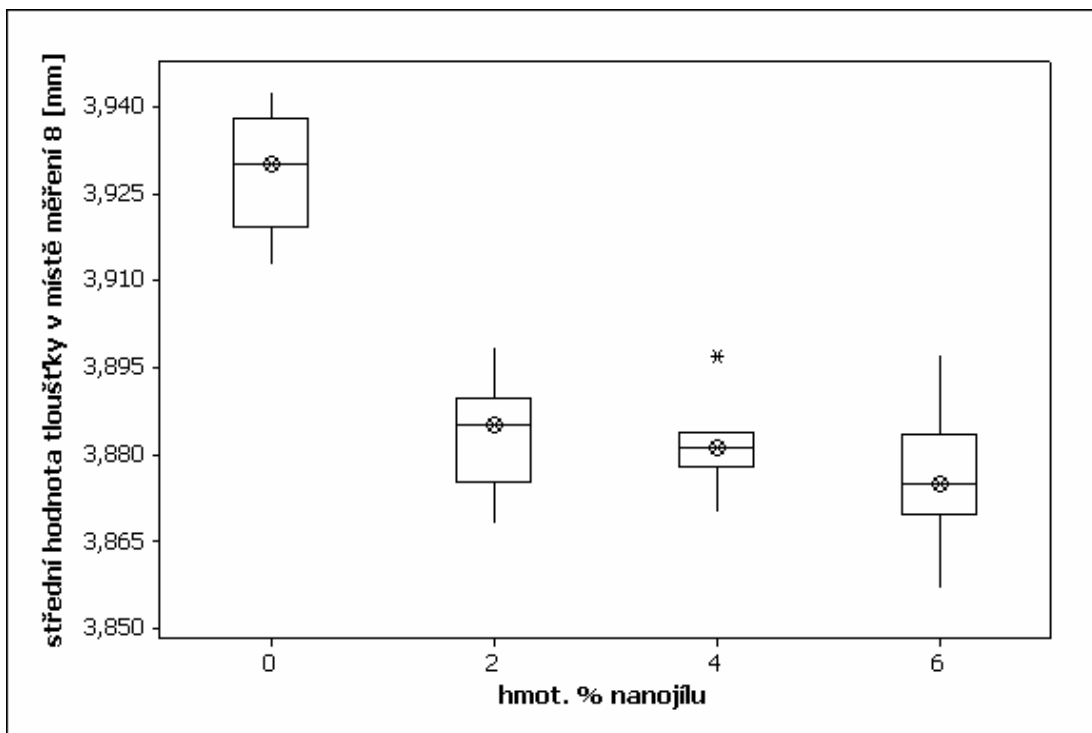
Tab. 4.5: p-hodnoty statistických metod pro \bar{X}_{t_2} a \bar{X}_{t_8}

Tab. 4.5: p-hodnoty statistických metod pro X_{t2} a X_{t8}						
	p-hodnota [1]					
	A-D				BT/LN	AN/K-W
	hmot. % nanojílů					
	0	2	4	6		
\bar{x}_{t2}	0,791	0,134	0,813	0,512	0,108/0,047	0/-
\bar{x}_{t8}	0,686	0,852	0,111	0,561	0,460/0,430	0/-



Obr. 4.21: Krabicové diagramy \bar{X}_{t_2} pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty


Obr. 4.22: Krabicové grafy \bar{X}_{t8} pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty

4.9.6 Vyhodnocení vlivu koncentrace nanojálu na tloušťku tělíska 2

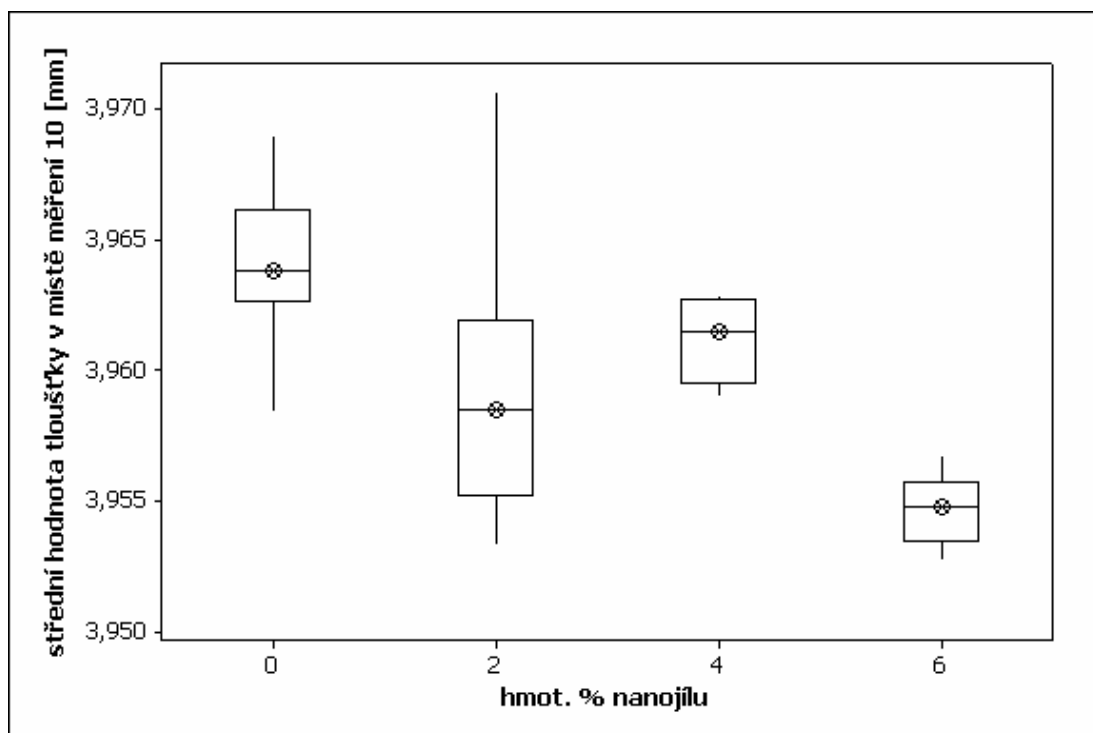
Místa měření 10 až 13

Z krabicových grafů obr. 4.24 až obr. 4.26 je vidět zjevná odlišnost střední hodnoty tloušťky neplněné série od plněných sérií.

Tab. 4.6: p-hodnoty statistických metod pro \bar{X}_{t10} až \bar{X}_{t13}

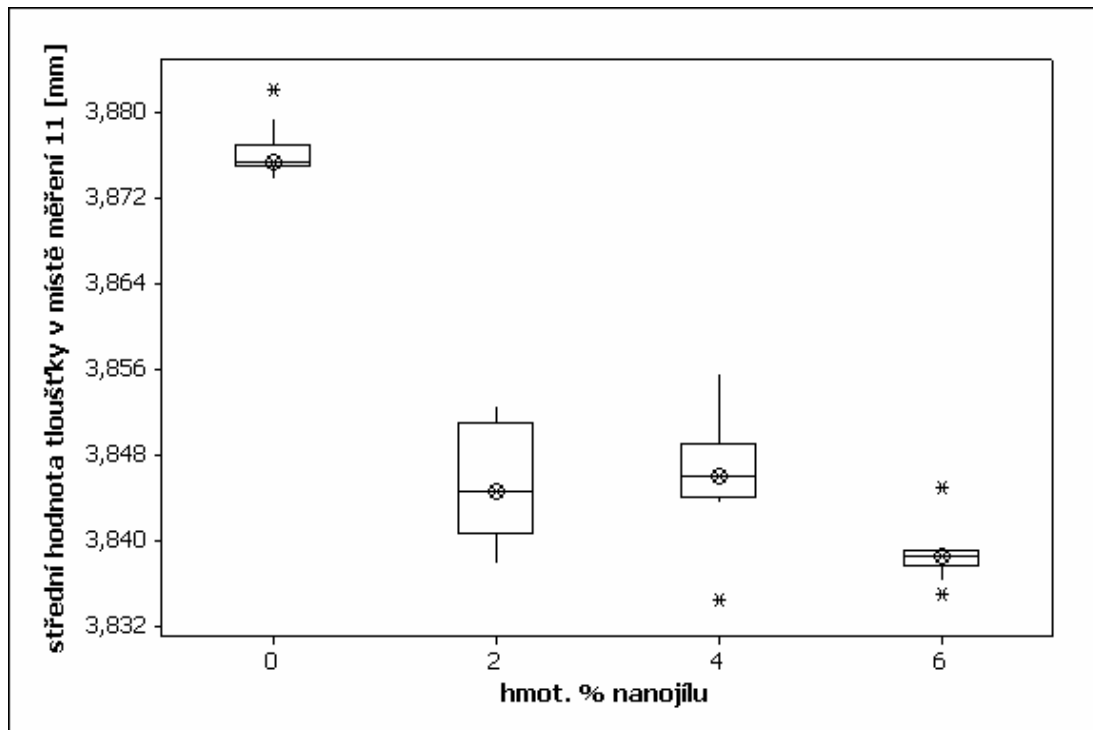
	p-hodnota [1]					
	A-D				BT/LN	AN/K-W
	hmot. % nanojílů					
	0	2	4	6		
$\bar{x}_{t_{10}}$	0,502	0,287	0,226	0,950	0/0,042	-/0
$\bar{x}_{t_{11}}$	0	0,326	0,198	0,111	-/0,106	-/0
$\bar{x}_{t_{12}}$	0,453	0,161	0,218	0,633	0,819/0,831	0,001/-
$\bar{x}_{t_{13}}$	0,046	0,216	0,399	0,891	-/0,072	- /0

OMMP pro \bar{X}_{t10} vykazala shodnost série 2% se sériemi 4% a 6% a shodnost mezi sériemi 0% a 4%. OMMP pro \bar{X}_{t11} a \bar{X}_{t13} a T-metoda pro \bar{X}_{t12} vykazaly odlišnost série 0% od plněných sérií, které se navzájem statisticky neodlišují. (viz. tab. 4.6)



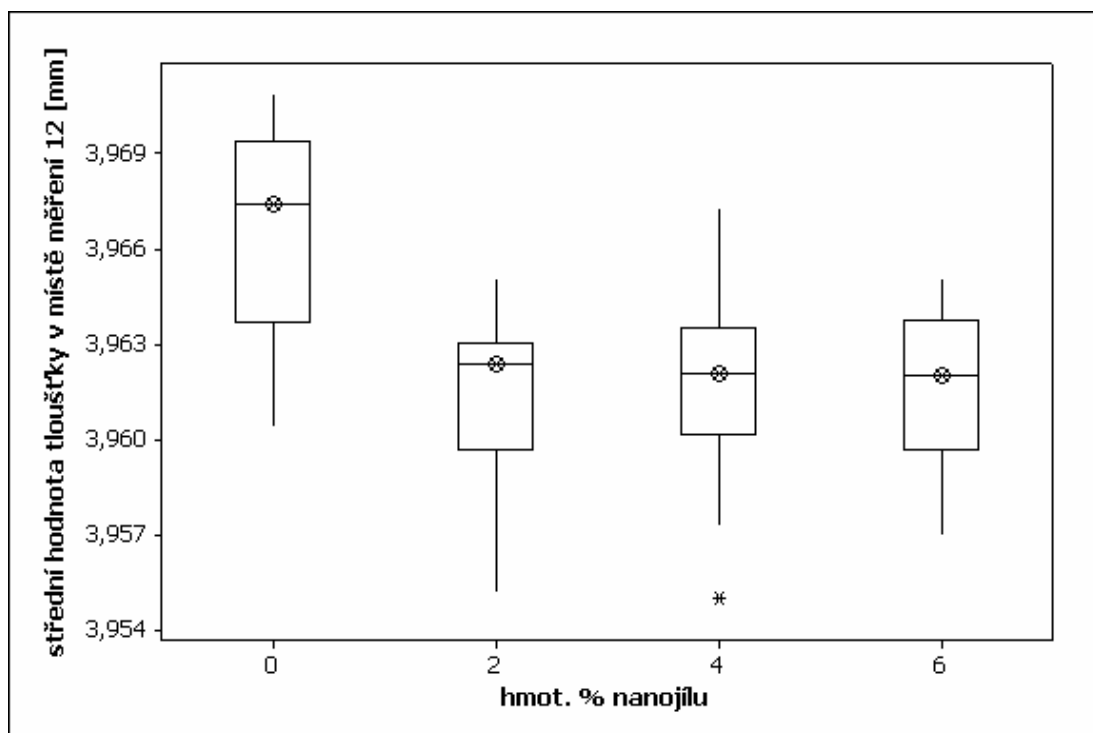
Obr. 4.23: Krabicové diagramy $\bar{X}_{t_{10}}$ pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty



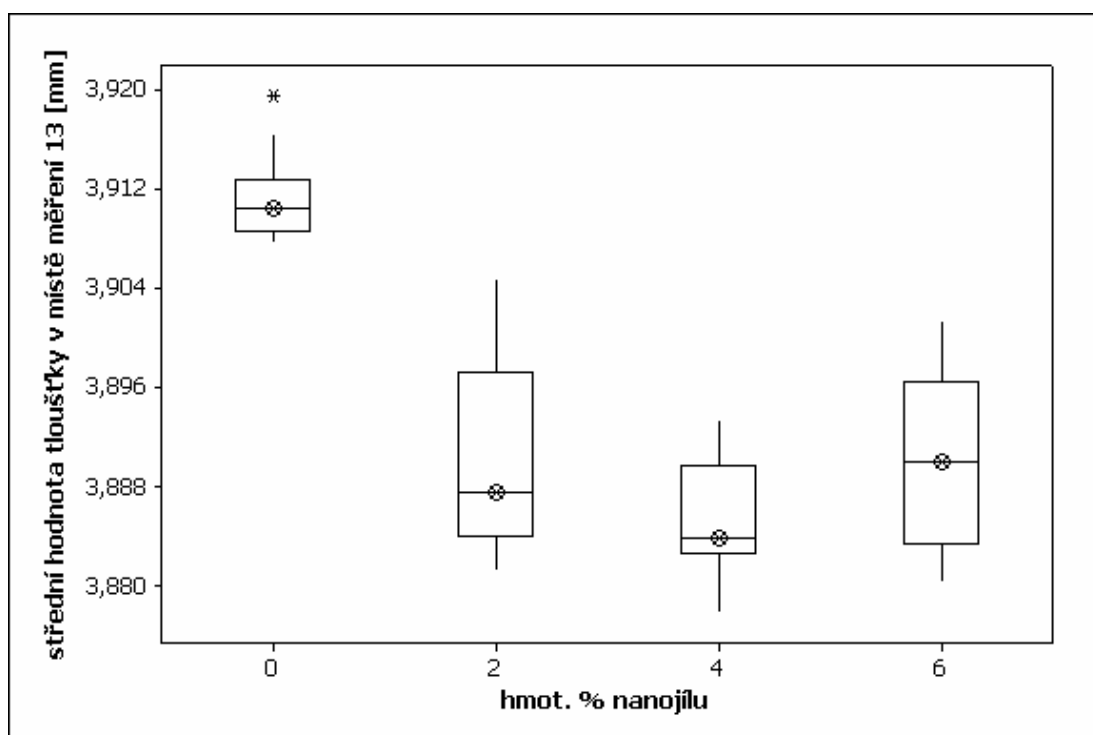
Obr. 4.24: Krabicové grafy $\bar{X}_{t_{11}}$ pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty



Obr. 4.25: Krabicové grafy \bar{X}_{t12} pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty



Obr. 4.26: Krabicové grafy \bar{X}_{t13} pro jednotlivé série

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty

4.9.7 Dílčí závěr

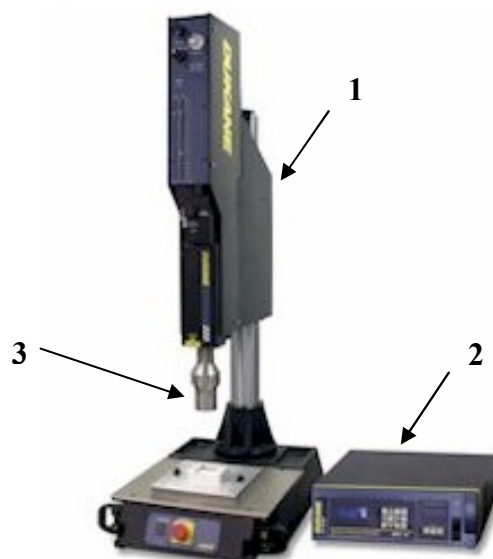
V místech měření 1, 3, 7, 9, 10, 12 byla zjištěna maximální střední hodnota tloušťky $\bar{x}_{t_{\max 1}} = 4,152$ mm pro tělísko 1 a $\bar{x}_{t_{\max 2}} = 3,971$ mm pro tělísko 2. Tyto hodnoty byly použity pro výpočet teoretické výšky svařence. Z krabicových grafů je vidět zjevný pokles tloušťky tělísek z plněného polypropylenu oproti tloušťce tělísek z neplněného polypropylenu. Rozdíly v tloušťkách se pohybují v řádu jednotek až desítek mikrometrů. Při statistické analýze tloušťky tělísek v sedmi vyhodnocovaných místech vyšla v pěti případech statisticky významná odlišnost série 0% od všech plněných sérií, které se vzájemně neodlišují. V jednom případě vyšla odlišnost série 0% od plněných sérií a byly navíc detekovány odlišnosti mezi plněnými sériemi. V místě 10 se vztahy mezi sériemi liší od ostatních měřených míst. Výběrové směrodatné odchylky střední hodnoty tloušťky pro jednotlivé série v místě 10 nejsou výrazně větší než pro ostatní místa měření. Odlišnost je pravděpodobně způsobena chybným zaměřením místa měření.

Při shodných parametrech vstřikování dojde tedy k poklesu tloušťky tělísek plněných sérií oproti tloušťce tělísek neplněné série. Tloušťka mezi plněnými sériemi je shodná. Z naměřených hodnot lze považovat proces vstřikování za stabilní.

4.10 Ultrazvukové svařovací zařízení

4.10.1 Popis

Svařování bylo uskutečněno na ultrazvukovém svařovacím zařízení od firmy Dukane (obr. 4.27) skládající se z pneumatické lisovací jednotky (Thruster Model 220), která obsahuje ultrazvukový rezonátor řízený elektronickou jednotkou (DPC IV Plus 2220) generující signál o frekvenci 20 kHz o maximálním výkonu 2200 W.



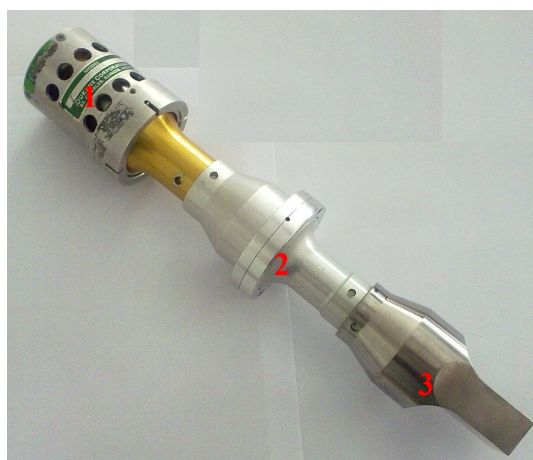
Obr. 4.27: Ultrazvukové svařovací zařízení firmy Dukane

1- lisovací jednotka (Thruster model 220); 2 - řídicí jednotka (DPC IV Plus);

3 - rezonátor

Ultrazvukový rezonátor

Ultrazvukový rezonátor (obr. 4.28) se skládal z převodníku, zesilovače a titanové sonotrody s obdélníkovým profilem pracovní plochy o rozměrech 26,36 x 55,12 mm. Převodník generoval nominální amplitudu od vrcholu k vrcholu 20 μm a pomocí zesilovače o zesílení 2,5 [1] a sonotrody se zesílením 2 [1] bylo na pracovní ploše sonotrody dosaženo nominální amplitudy 100 μm , která byla ověřena měřením v servisním středisku Dukane.



Obr. 4.28: Ultrazvukový rezonátor (Dukane)

1 - převodník; 2 - zesilovač; 3 - sonotroda

Řídící jednotka - DPC IV 2220

Na řídící jednotce je možné nastavovat tlak pro pohyb sonotrody (resp. pojezdu) na svařované díly, svařovací tlak (jedna nebo dvě tlakové hladiny, křivka tlaku), metodu svařování (na čas, na relativní nebo absolutní vzdálenost, na energii, na špičkový výkon), přídavné vibrace při řezání materiálu, dotlak po svařování, ukončení fáze dotlaku (časově, relativní vzdáleností, nulovou rychlostí sonotrody, funkce deaktivována), dodatečné vibrace po fázi dotlaku (pro sklepnutí přichyceného dílu k sonotrodě), velikost tlaku pro zpětný pohyb sonotrody do výchozí pozice, volbu metody spínání vibrací (předdefinovanou silou, nulovou rychlostí sonotrody, atd.). Z řídící jednotky byly sbírány data jednotlivých cyklů (jako csv soubory) do počítače přes sériové rozhraní prostřednictvím programu iPC 1.6. Bylo možno volit snímání grafů s volbou veličin na svislé i vodorovné ose (čas; výkon; energie; pozice, rychlost a síla na sonotrodě; pracovní tlak ve válci; amplituda) jako csv soubory. Jednotkou lze elektronicky řídit velikost amplitudy v rozsahu 37 až 100 % nominální hodnoty amplitudy.

Lisovací jednotka - Thruster 220

Pohonem lisovací jednotky je dvoučinný pneumatický válec s možností škrcení na výstupu, který ovládá pojezd s upnutým rezonátorem. Při výpočtu síly působící na svařované díly je nutné počítat nejen s teoretickou silou generovanou pneuválcem (4.4), ale i s tíhou pojezdu a rezonátoru (4.6).

$$F_{pv} = p_p \cdot S_p / 1000 \quad (4.4)$$

$$S_p = (\pi \cdot D_p^2) / 4 = 3166,9 \text{ mm}^2 \quad (4.5)$$

$$G_{pr} = m \cdot g = 4,2 \cdot 9,81 = 41,2 \text{ N} \quad (4.6)$$

kde je:

F_{pv} ... teoretická síla generovaná pneumatickým válcem při pracovním tlaku p_p

S_p ... plocha pístu pneuválce [mm^2]

G_{pr} ... tíha pojezdu a použitého rezonátoru [N]

$D_p = 63,5 \text{ mm}$... aktivní průměr pístu pneumatického válce svářečky

p_p ... pracovní tlak pneumatického válce [kPa]

$m = 4,2 \text{ kg}$... změřená hmotnost sonotrody a pojezdu (měření ovlivněno třením)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$... tíhové zrychlení

4.10.2 Stanovení metody a parametrů svařování

Metoda svařování a svařovací parametry byly voleny s ohledem na svařovaný materiál, velikost svaru a rozměry zkušebních svařovaných tělísek.

Metoda svařování

Zvolila se metoda svařování na absolutní vzdálenost, při které je fáze vlastního svařování ukončena dosažením přednastavené hodnoty polohy sonotrody. To teoreticky poskytuje konstantní výšku svařence. Důvodem byla obava ze snadné deformovatelnosti ostré špičky usměrňovače energie z houževnatého materiálu, což by u metody svařování na relativní vzdálenost mohlo výrazně ovlivnit výšku svařence a tedy i pevnost svaru. Volil se konstantní průběh svařovacího tlaku, což je nejjednodušší varianta. Svařování na konstantní tlak vyžaduje dva svařovací parametry a to svařovací tlak a parametr definující ukončení fáze vlastního svařování, kterým byla při svařování na konstantní vzdálenost pozice sonotrody na konci svařování.

Hydraulické brzdění

Předběžná měření bez hydraulického brzdění vykazovala nízké hodnoty pevnosti svaru s vysokou kolísavostí. Nastavení svařovacího procesu pro dosažení doporučené co nejkonstantnější svařovací rychlosti prostřednictvím svařovacího tlaku, svařovací amplitudy a škrcením na výstupu pneuválce bylo náročné. Proto se zvolilo svařování s hydraulickým brzděčem integrovaným v lisovací jednotce. Úkolem brzděče je zajištění konstantní svařovací rychlosti, která je doporučována pro zajištění konstantního toku taveného plastu ve spoji při svařování. Svařovací rychlost je pak řízena prostřednictvím stupně brzdění hydraulického brzděče a svařovacího tlaku. Lze ji ovlivnit také škrcením, protože škrtící ventil reguluje průtok vzduchu na výstupu z komory pneuválce, která není právě pracovní.

Užitý brzděč (obr. 4.29) je kombinací nárazového absorbéru a zpětného ventilu. Konstrukčně je složen z hydraulického válce pevně připevněného na konzoli lisovací jednotky a pístku, který je z válce vysunutý o 25,4 mm. Principem brzdící funkce je přepouštění silikonové kapaliny přes štěrbinu ve válci, kde na kapalinu tlačí pístek, který je v kontaktu se stavitelným dorazem na pojezdu lisovací jednotky, kterou

pístek brzdí. Vlastní svařování by mělo probíhat při poloze brzdícího pístku za náběhovou zónou dlouhou 6,4 mm. Na zbývajících 19 mm možné dráhy pístku by měla být svařovací rychlost konstantní. Stupnice brzdíče má rozsah 0 (nejmenší odpor) až 30 dílků (největší odpor). [13, s. 32 - 33]

Konstrukční řešení nastavování stupně brzdění má vliv na opakovatelnost jeho nastavení, protože se stupnice nachází ve stísněném prostoru a pohled v normále na válcovou stupnici není pro vyšší intenzitu brzdění možný. Proto se musela vytvořit pomocná ryska na ovládacím členu brzdíče a užít přepočty polohy originální rysky prostřednictvím pomocné rysky. Přesnost nastavování také ztěžovala radiální mezera mezi pevnou stupnicí a nastavovací ryskou.



Obr. 4.29: Integrovaný hydraulický brzdíč na lisovací jednotce Dukane

1 - hydraulický brzdíč; 2 - ovládací prvek brzdíče

Konstantní svařovací parametry

Tlak p_{ds} pro pohyb sonotrody ke svařovaným dílům byl volen nízký a to 15 kPa. Pro spouštění ultrazvukových vibrací sonotrody byla zvolena metoda spouštění pomocí síly na sonotrodě. Takže po dosednutí sonotrody na svařované díly a vyvinutí přednastavené síly sonotrodou dojde k aktivaci vibrací. Iniciace vibrací při nulové rychlosti sonotrody aktivovala vibrace před dosednutím sonotrody na díly i při nízkém stupni brzdění, což bylo pro záměr měřit energii dodanou dílům během fáze vlastního svařování nežádoucí. Snímá se pouze síla F_{pv} působící od pneuválce na pojezd a její hodnota při tlaku $p_{ds} = 15$ kPa činí 47,5 N. Síla pro sepnutí ultrazvuku F_u byla nastavena s určitou rezervou vzhledem k třecím odporům pohybujících se částí na hodnotu 30N. Sonotroda v okamžiku sepnutí vibrací působila teoreticky na

svařovaná tělíska silami $F_u = 30\text{ N}$ a tíhou pojezdu a rezonátoru $G_{pr} = 41,2\text{ N}$. Tlak p_{ds} se volil co nejnižší, aby byla deformace špičky usměrňovače co nejmenší a rovněž napomáhal doporučenému vzájemnému srovnání sonotrody a svařovaného dílu před iniciací vibrací. Jednoduchým orientačním tlakovým testem na zkušebním zařízení Hounsfield H10KT se snímačem 500 N se špička usměrňovače zatížila silou odpovídající součtu sil F_u a G_{pr} , což vyvolalo průměrnou deformaci špičky usměrňovače energie $70\text{ }\mu\text{m}$ na deseti měřených kusech neplněné série. Hodnota tlaku p_{ds} musela rovněž vyhovovat pro hydraulické brzdění. Nárůst p_{ds} zvýší rychlost sonotrody a což může vyvolat sepnutí vibrací už v náběhové zóně brzdíče. Stejný efekt má zvýšení stupně brzdění při vyšší rychlosti sonotrody. Tlak p_{ds} a škrcení musely být sladěny tak, aby nedocházelo k předčasnému sepnutí vibrací při aktivaci brzdíče a zároveň škrcení nemělo vliv na svařovací rychlost. Škrťicím ventilem byl nastaven plynulý pohyb sonotrody rychlostí 100 mm/s z výchozí pozice k dílům.

Svařovací tlak se po ukončení vlastní fáze svařování přepnul na tlak pro fázi dotlaku $p_h = 50\text{ kPa}$. Čas dotlaku t_h byl volen 6 s , což byl dostačující čas pro tuhnutí a chladnutí svaru. Provedla se orientační kontrola tlakového napětí σ_{dsv} (4.7) ve svaru, aby zatížení spoje nebylo od tlaku p_h příliš vysoké. Plocha svaru byla ve skutečnosti nepravidelná a proto byla brána za plochu svaru půdorysná plocha usměrňovače S_{sv} (4.8).

$$\sigma_{dsv} = (F_h + G_{pr}) / S_{sv} = (158,3 + 41,2) / 11,55 = 17,3\text{ MPa} \quad (4.7)$$

$$S_{sv} = e \cdot B = 10 \cdot 1,155 = 11,55\text{ mm}^2 \quad (4.8)$$

kde je:

σ_{dsv} ... tlakové napětí ve svaru od sil F_h a G_{pr}

S_{sv} ... plocha svaru vycházející z půdorysného rozměru usměrňovače

$F_h = 158,3\text{ N}$... síla F_{pv} pneuválce při tlaku $p_h = 50\text{ kPa}$

$e = 10\text{ mm}$... délka svaru

$B = 1,15\text{ mm}$... šířka základny usměrňovače energie o výšce 1 mm

Teoretické napětí ve svaru ve fázi dotlaku vyšlo $17,3\text{ MPa}$, což je vyhovující hodnota. Tlak pro návrat pojezdu do výchozí pozice $p_{us} = 50\text{ kPa}$ zajistil svižný návrat pojezdu a udržení pojezdu v této pozici.

Proměnné svařovací parametry

Za proměnné svařovací parametry byla zvolena svařovací amplituda A_w a stupeň brzdění K se svařovacím tlakem p_w sloužily k řízení svařovací rychlosti. Svařovací rychlost a amplituda byly tedy hlavními proměnnými svařovacími parametry.

4.11 Výpočet výšky svařence

Pro nastavení teoretické výšky svařence a možnost kontroly přesnosti odměřování polohy sonotrody na svařovacím zařízení byla vyrobena kontrolní vložka z oceli 11600 o výšce $h_i = 8,01$ mm (obr. 4.30). Lisovací jednotka se uvedla do režimu přerušení a zajistilo se velice opatrné dosednutí sonotrody na kontrolní vložku vloženou do drážky svařovacího přípravku pro tělísko 2. Pak se na řídicí jednotce odečetla poloha sonotrody d_{sc} dosednuté na kontrolní vložce. Teoretická absolutní poloha sonotrody na konci fáze vlastního svařování d_{wft} zadávaná do řídicí jednotky se vypočítala následovně:

$$\begin{aligned} d_{wft} &= d_{sc} + h_i - \bar{x}_{t_{max1}} - \bar{x}_{t_{max2}} - h_g = 96,765 + 8,01 - 4,152 - 3,971 - 0,037 = \\ &= 96.615 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.9)$$

kde je:

$d_{sc} = 96,765$ mm ... absolutní poloha sonotrody dosedlé na kontrolní vložku

$h_i = 8,01$ mm ... výška kontrolní vložky

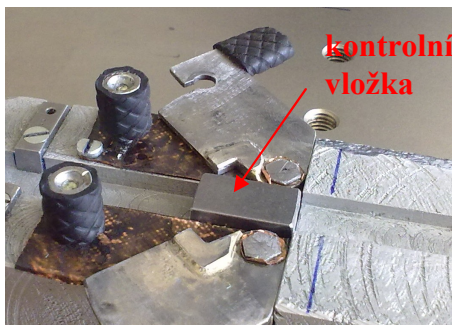
$\bar{x}_{t_{max1}} = 4,152$ mm ... maximální střední hodnota tloušťky tělíska 1 (viz kapitola 4.9)

$\bar{x}_{t_{max2}} = 3,971$ mm ... maximální střední hodnota tloušťky tělíska 2 (viz. kapitola 4.9)

$h_g = 0,037$ mm ... mezera mezi díly po svařování při maximální střední tloušťce tělísek (kladná osa odměřovacího systému směřuje dolů)

Výpočet neuvažuje propad svarových ploch a mezera h_g sloužila na pokrytí nepřesnosti polohování sonotrody, nerovnoběžnosti svarových ploch atd. Výška svařence musela být nastavena na optimální hodnotu, která poskytla dostatečně pevný svar pro manipulovatelnost se svařencem a zároveň musela být pevnost svaru nižší než pevnost svařovaných tělísek, aby nedocházelo k destrukci svařence mimo svar. Velikost mezery mezi svařenými díly se dle literárních zdrojů počítá jako osmina výšky usměrňovače. Při teoretické výšce usměrňovače 1 mm by měla být mezera mezi tělísky po svaření 0,125 mm. Mezera mezi svařenými tělísky, která se

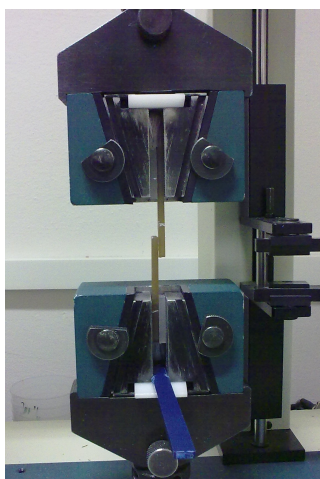
kontrolovala spárovými měrkami na několika svařencích z neplněného PP pro různé velikosti svařovacího tlaku, ležela v rozsahu 0,1 - 0,15 mm. Mechanický doraz ochrany sonotrody byl nastaven na 97,2 mm.



Obr. 4.30: Kontrolní vložka umístěná ve svařovacím přípravku

4.12 Popis zjišťování pevnosti svarového spoje

Pevnost svarového spoje se hodnotila prostřednictvím destrukční síly F_d , která se zjišťovala na stejném zkušebním zařízení jako u tahové zkoušky a za stejných klimatických podmínek, rychlosti zkoušení, ale bez užití průtahoměru. Vzhledem k tomu, že svařenec byl osazeného tvaru, tak bylo nutné použít pro jeho upnutí do upínacích čelistí dvou pomocných plastových vložek. Pro dlouhé zkušební tělísko byla užitá vložka o rozměru 10 x 4 – 30 mm a pro krátké vložka 10 x 4 - 10 mm.



Obr. 4.31: Svařenec upnutý v horní čelisti zkušebního zařízení při otevřené spodní čelisti pomocí rozpěrky (zobrazena modře)

Svařence se upínaly do osy zkušebního zařízení a jejich poloha v upínacích čelistech byla nastavována prostřednictvím pomocných plastových vložek. Vzdálenost čelistí bez upnutí svařence byla nastavena pro dlouhá tělíska na 30 mm a pro krátká tělíska na 10 mm. Aby se předešlo ovlivnění nebo poškození svaru během upínání, byla spodní upínací čelist během upínání svařence do horní čelisti rozevřena plastovou rozpěrkou (obr. 4.31).

4.13 Popis experimentálních měření ultrazvukového svařování

Experimentální měření probíhaly při konstantní přednastavené teoretické absolutní poloze sonotrody na konci fáze vlastního svařování d_{wft} (tj. nastavená konstantní výška svařence) pro 0, 2, 4 a 6 hmotnostních procent nanojílů v plněném polypropylenu s využitím hydraulického brzdíče. Hlavními svařovacími parametry, které se měnily, byla svařovací rychlost v_w a svařovací amplituda A_w . Svařovací rychlost se nastavovala prostřednictvím dvou parametrů a to stupně brzdění K a svařovacího tlaku p_w . Z tohoto důvodu byly provedeny dva experimenty, kde se měnil vždy jeden parametr ovlivňující rychlost svařování. V prvním experimentu se měnil stupeň brzdění od nízké po vysokou hodnotu při nízkém svařovacím tlaku, což způsobovalo pokles svařovací rychlosti. V druhém experimentu, který byl započat při stejných svařovacích podmínkách jako první experiment, byl zvyšován svařovací tlak z nízké hodnoty po maximálně možnou hodnotu při nízkém konstantním stupni brzdění, což rychlost svařování zvyšovalo. Experiment při změně svařovací amplitudy proběhl pro tři různé podmínky svařování (K , p_w), aby byl případně zjištěn i vliv velikosti amplitudy na pevnost spoje v závislosti na podmínkách svařování.

Při experimentech, kde se zjišťoval vliv svařovací rychlosti na pevnost spoje prostřednictvím změny řídicích parametrů svařovací rychlosti (svařovací tlak a stupeň brzdění), byl vždy konstantní řídicí parametr na nízké hodnotě. Proto se provedl experiment, kdy se svařovalo za vyššího svařovacího tlaku a vysokého stupně brzdění. Oba parametry se nastavily tak, aby se dosáhlo rychlosti svařování, která byla shodná s rychlostí svařování dosaženou ve vybraném předchozích měřeních. Porovnávala se tedy data získaná při svařování za rozdílných řídicích parametrů, které ale vyvolaly shodnou svařovací rychlost. Cílem bylo zjistit, zda

velikost řídicích parametrů svařovací rychlosti má vliv na svařovací proces a tedy i pevnost svaru.

Z vyhodnocených výsledků experimentů je patrné, že neplněná série vykazuje výrazně větší pevnost svarového spoje než plněná série. Příčinou je zvětšená mezera mezi díly po svaření u plněných sérií při užití metody svařování na absolutní vzdálenost. Zvětšení mezery bylo způsobeno snížením tloušťky tělísek ve svarových plochách u plněných sérií vlivem plniva. Proto bylo provedeno měření u neplněné série s upravenou absolutní polohou sonotrody na konci fáze vlastního svařování d_{wft} , tak aby mezera mezi díly po svaření tělísek z neplněného polypropylenu odpovídala, resp. se blížila mezeře mezi díly u plněných sérií. Zjištěné výsledky byly použity pro výpočet korekčních koeficientů, které vyjadřují vliv změny rozměrů svařovaných tělísek vlivem plniva na měřené veličiny při svařování na absolutní vzdálenost. Korekčními koeficienty lze tedy měřené veličiny pro neplněnou sérii přiblížit stavu, který by byl dosažen metodou svařování na relativní vzdálenost.

Vzhledem k tomu, že tělísko 1 v průběhu svařování intenzivně vibrovalo a navíc se jeho délka pohybovala v určité toleranci, tak se zjišťoval vliv délky tělíska 1 a velikosti podélné vůle jeho uložení v přípravku na pevnost svaru.

Zjišťovalo se také poškození tělíska 1 od pracovní plochy sonotrody, které bylo hodnoceno pouze vizuálně.

Zjištěný vliv procenta nanojílu, resp. koncentrátu na pevnost plněného polypropylenu (viz kapitola 4.8) nebyl při hodnocení pevnosti svaru brán v úvahu. Změna pevnosti svaru vyvolaná změnou pevnosti materiálu vlivem koncentrace plniva byla v porovnání s rozptylem naměřených pevností svaru zanedbatelná. Navíc plocha svaru byla nepravidelná, měnila se svar od svaru a byla závislá na svařovacích podmínkách.

U každého svařence se před destrukční zkouškou orientačně měřila jeho výška v místě usměrňovače energie digitální posuvkou Mitutoyo CD-15CPx pro orientační kontrolu za účelem odhalení a vyřazení zmetků.

Statistická analýza dat byla provedena pouze pro prioritně sledovanou měřenou veličinu, kterou byla destrukční síla. Energie svařování a okamžitý maximální výkon byl porovnáván pouze prostřednictvím středních hodnot.

4.13.1 Přehled experimentálních měření

V tabulce 4.7 je uveden přehled provedených měření, kde se zjišťovaly následující vlivy na pevnost svarového spoje a další měřené veličiny:

- 1) vliv změny mezery mezi svařenými tělísky pro 0% plniva
- 2) vliv změny stupně brzdění
- 3) vliv změny svařovacího tlaku
- 4) vliv změny svařovací amplitudy
- 5) vliv změny K a p_w pro shodnou svařovací rychlost
- 6) vliv změny délky svařovaného tělíska 1
- 7) vliv změny velikosti podélné vůle uložení svařovaného tělíska 1

Tab. 4.7: Grafický přehled nastavení svařovacích parametrů pro experimenty

	K [1]					
p_w [kPa]	3	6	9	12	15	20
15						
50						
60						
100						
300						
600						

Legenda:

- amplituda svařování $A_w = 100 \mu\text{m}$ při d_{wft} pro 0, 2, 4, 6%
- amplituda svařování $A_w = 70 \mu\text{m}$ při d_{wft} pro 0, 2, 4, 6%
- amplituda svařování $A_w = 70 \mu\text{m}$ při d_{wft} 0%
- amplituda svařování $A_w = 100 \mu\text{m}$ při d_{wft} pro 0%, krátké tělísko
- amplituda svařování $A_w = 100 \mu\text{m}$ při d_{wft} 0%
- amplituda svařování $A_w = 100 \mu\text{m}$ při d_{wft} pro 0%, podélná vůle 0,1 mm
- amplituda svařování $A_w = 100 \mu\text{m}$ při d_{wft} pro 0%, podélná vůle 0,4 mm

Není-li specifikováno pro dané měření tělísko, tak bylo užito dlouhé tělísko 1 s proměnlivou podélnou vůlí uložení v přípravku 0,1 - 0,4 mm. Vůle uložení pro nejdelší změřené tělísko byla volena 0,1 mm a protože se délka tělísek pohybovala v rozmezí $\pm 0,15$ mm, tak podélná vůle uložení vychází 0,1 až 0,4 mm. Parametry svařování $p_{ds} = 15$ kPa, $F_u = 30$ N; $p_h = 50$ kPa; $t_h = 6$ s; $p_{us} = 50$ kPa byly pro všechna měření konstantní. Rychlost sjíždění sonotrody na svařované díly byla nastavena prostřednictvím škrtícího ventilu a tlaku p_{ds} na 100 mm/s. Pro každé měření se použil stejný počet zkušebních svařenců $n = 21$ pro vyváženost experimentu a vyšší hodnota byla volena z důvodu patrné nestability svařovacího procesu.

Při svařování byla prováděna kontrola vzájemné polohy ultrazvukového rezonátoru a pojezdu. Kontrolní vložka o výšce h_i se vkládala do drážky svařovacího přípravku pro tělísko 2 a následně se na ni nechala dosednout sonotroda v nouzovém režimu. Naměřené hodnoty polohy sonotrody při dosedu na vložku d_{sc} se měnily v řádu jednotek mikrometrů a přednastavená hodnota konce svařování d_{wft} byla dle těchto měření korigována. Změny d_{wft} byly způsobeny mikroposuvy rezonátoru upnutého v uzlovém bodě zesilovače v pojezdu sonotrody prostřednictvím třecí vazby.

Některé naměřené datové soubory byly použity ve více srovnáních z důvodu překryvu podmínek svařování při jednotlivých experimentech. Pokud se při vyhodnocování měření použila data z jiného měření, tak je uveden odkaz na umístění převzatých dat.

4.13.2 Snímané veličiny během svařování

Snímání veličin pomocí programu iPC 1.6 bylo zaměřeno na fázi vlastního svařování. Z dráhy sonotrody při fázi vlastního svařování d_w a času vlastního svařování t_w se vypočítala průměrná svařovací rychlost pro jednotlivé cykly svařování (4.10).

$$v_w = d_w / t_w \quad (4.10)$$

kde je:

v_w ... průměrná svařovací rychlost [mm/s]

d_w ... dráha vlastního svařování [mm]

t_w ... čas vlastního svařování [s]

Dalšími snímanými veličinami byly:

d_{wf} [mm] ... absolutní poloha sonotrody na konci fáze vlastního svařování

d_h [mm] ... posun sonotrody během fáze dotlaku

d_{hf} [mm] ... absolutní poloha sonotrody na konci fáze dotlaku

d_u [mm] ... absolutní poloha sonotrody při sepnutí ultrazvuku

E_w [J] ... energie svařování (dodaná dílům ve fázi vlastního svařování)

P_m [W] ... maximální okamžitý výkon (sonotrody)

Sledoval se také grafický průběh závislosti okamžité síly na sonotrodě F_s , okamžité rychlosti sonotrody v_s a dráhy sonotrody d_s na čase. Data nejsou v disertaci uvedena.

4.14. Měření vlivu změny mezery mezi svařenými neplněnými tělísky

Snížení tloušťky tělísek v místech svarových ploch u plněných sérií oproti neplněným sériím vlivem plniva (viz. kapitola 4.9) výrazně snížilo pevnost svaru při svařování na konstantní absolutní polohu sonotrody $d_{wft} = 96,615$ mm. Důvodem bylo zvýšení mezery mezi tělísky u plněných sérií. Provedly se měření pro neplněnou sérii pro tři různé podmínky svařování při upravené absolutní poloze sonotrody na konci vlastní fáze svařování d_{wft}' . Cílem bylo dosáhnout stejné nebo podobné mezery mezi svařenými díly jako byla u plněných sérií, tzn. jako kdyby se svařovalo metodou na relativní vzdálenost. d_{wft}' se získala zmenšením d_{wft} o největší průměrné změny tloušťky na měřených dílech mezi neplněnou sérií a plněnými sériemi. Podílem středních hodnot veličin (F_d , E_w , P_m) změřených při d_{wft}' a d_{wft} se vypočítaly korekční koeficienty sloužící k orientační korekci vybraných měřených veličin pro neplněný PP zjištěných v měřeních při d_{wft} . Korigované série jsou označeny symbolem “ ‘ ”.

4.14.1 Výpočet d_{wft}'

Při výpočtu d_{wft}' se vycházelo z rozdílu průměrů středních hodnot tloušťek \bar{X}_t v místech 2 a 8 na tělísku 1 a v místě 11 na tělísku 2, které ležely na osách tělísek.

Hodnoty \bar{X}_t pro zmíněná místa jsou převzata z kapitoly 4.9 a znova uvedena v tabulce 4.8.

Tab. 4.8 Hodnoty \bar{X}_t v místech měření 2, 8 a 11

hmot. % nanojílu	\bar{X}_{t_2} [mm]	\bar{X}_{t_8} [mm]	$\bar{X}_{t_{11}}$ [mm]
0	3,903	3,929	3,876
2	3,874	3,884	3,845
4	3,867	3,881	3,846
6	3,863	3,876	3,839

Pro místa 2, 8 a 11 se vypočítal aritmetický průměr z hodnot \bar{X}_t ze sérií 2%, 4% a 6%, který se odečetl od hodnoty \bar{X}_t série 0% v daném místě. Z vypočítaných rozdílů (35 μm pro místo 2 a 49 μm pro místo 8) se vypočítal opět aritmetický průměr rovnající se 42 μm . Rozdíl spočítaný pro místo 11 je 33 μm . Korekce $u = 0,033 + 0,042 = 0,075$ mm byla použita pro výpočet d_{wft}' (4.11) (pro zvýšení mezery mezi neplněnými svařenými díly).

$$d_{\text{wft}}' = d_{\text{wft}} - u = 96,615 - 0,075 = 96,540 \text{ mm} \quad (4.11)$$

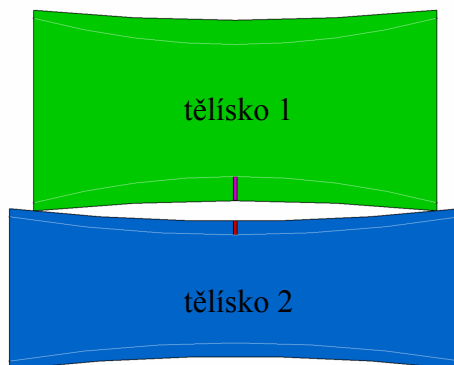
kde je:

d_{wft}' ... upravená teoretická absolutní pozice sonotrody na konci vlastní fáze svařování [mm]

$d_{\text{wft}} = 96,615$ mm ... teoretická absolutní pozice sonotrody na konci vlastní fáze svařování

$u = 0,075$ mm ... korekce (tloušťky tělísek mezi neplněnou sérií a plněnými sériemi)

Změna tloušťky tělísek vlivem plniva byla na bocích v řádu mikrometrů a v ose v řádu desítek mikrometrů (viz. kapitola 4.9). Špička usměrňovače byla v okamžiku sepnutí vibrací deformována silami $F_u + G_{\text{pr}}$ průměrně o 70 μm (viz. kapitola 4.10). V okamžiku sepnutí ultrazvukových vibrací průměrná deformace špičky usměrňovače pokryla rozdíly tloušťky od propadu v rovině kolmé na osu tělíska procházející špičkou usměrňovače. Bylo tedy uvažováno, že špička usměrňovače dosedá v okamžiku sepnutí vibrací na svarovou protiplochu tělíska 2 v celé své délce. Proto se vycházelo při výpočtu korekce z měřených míst na ose tělísek 2, 8, a 11. Na obr. 4.32 je zobrazen řez tělísky s vyobrazenými složkami korekce u .



Obr. 4.32: Ilustrativní řez kolmo na osu tělísek skrz špičku usměrňovače pro sérii 0% - bíle zobrazeny obrysy hran pro díly plněných sérií; uvažovaný rozdíl propadu tělíska 1 mezi 0% a plněnými sériemi zobrazen fialově (42 μm); uvažovaný rozdíl propadu tělíska 2 mezi 0% a plněnými sériemi zobrazen červeně (33 μm)

Data z měření série 0% pro $d_{\text{wft}}' = 96,540$ mm a naměřené hodnoty při $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm, které byly převzaty z měření vlivu změny stupně brzdění, vlivu změny tlaku a vlivu změny svařovací amplitudy (viz. kapitoly 4.15; 4.16; 4.17 a přílohy 6, 7, 8), byly použity pro výpočet korekčních koeficientů (tab. 4.12).

Podmínky svařování: I) $K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μm ; 0%

II) $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; 0%

III) $K = 6$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 70$ μm ; 0%

4.14.2 Zpracovaná naměřená data

Naměřené hodnoty pro $d_{\text{wft}}' = 96,540$ mm jsou uvedeny v příloze 5.

Tab. 4.9: Zpracovaná naměřená data za podmínek I pro d_{wft}'

	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_2 [mm]	d_{ft} [mm]
\bar{x}	183,9	8,15	64,4	569	0,522	0,207	2,523	96,020	96,542	0,201	96,743
s	18,7	0,01	3,2	12	0,013	0,007	0,087	0,013	0,002	0,006	0,006
x_{max}	223,2	8,17	71,1	591	0,557	0,220	2,682	96,037	96,546	0,211	96,754
x_{min}	159,4	8,13	59,5	551	0,503	0,195	2,359	95,983	96,540	0,190	96,732
Δ	63,8	0,04	11,6	40	0,054	0,025	0,323	0,054	0,006	0,021	0,022

Tab. 4.10: Zpracovaná naměřená data za podmínek II pro d_{wft}

	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{t1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{t2} [mm]	d_{t3} [mm]
\bar{x}	207,9	8,15	88,3	414	0,537	0,354	1,552	96,005	96,542	0,190	96,732
s	17,3	0,01	9,1	43	0,027	0,060	0,232	0,027	0,002	0,011	0,011
x_{max}	247,3	8,18	102,6	484	0,586	0,434	1,980	96,052	96,546	0,208	96,750
x_{min}	189,0	8,12	68,6	340	0,493	0,249	1,300	95,957	96,540	0,163	96,709
Δ	58,3	0,06	34,0	144	0,093	0,185	0,680	0,095	0,006	0,045	0,041

Tab. 4.11: Zpracovaná naměřená data za podmínek III pro d_{wft}

	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{t1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{t2} [mm]	d_{t3} [mm]
\bar{x}	183,7	8,16	119,1	230	0,532	0,761	0,720	96,009	96,541	0,182	96,723
s	48,2	0,02	24,1	17	0,022	0,139	0,122	0,022	0,001	0,012	0,012
x_{max}	267,8	8,19	172,7	270	0,580	1,068	0,947	96,043	96,543	0,206	96,746
x_{min}	91,7	8,12	81,6	201	0,498	0,547	0,478	95,963	96,540	0,158	96,699
Δ	176,1	0,07	91,2	69	0,082	0,521	0,469	0,080	0,003	0,048	0,047

4.14.3 Vyhodnocení

Vliv procenta plniva na destrukční sílu F_d , energii svařování E_w a okamžitý maximální výkon sonotrody P_m je vyjádřen korekčními koeficienty r_{qj} (4.12) uvedenými v tab. 4.12, které vyjadřují poměr středních hodnot zmíněných měřených veličin pro d_{wft} a d_{wft} . Z důvodu určité odlišnosti vypočítaných koeficientů r_{qj} pro jednotlivé podmínky měření se z nich stanovila střední hodnota $\bar{x}r_q$ (4.13), kterou lze orientačně vyjádřit odlišnost daných veličin při svařování za d_{wft} a d_{wft} .

$$r_{qj} = x_{qj} / x_{qj} \quad (4.12)$$

kde je:

r_{qj} ... korekční koeficient [1]

x_{qj} ... veličina měřená při d_{wft}

x_{qj} ... veličina měřená při d_{wft}

index $q = F_d, E_w, P_m$... vyjadřuje veličinu

index $j = I, II, III$... vyjadřuje podmínky svařování

$$\bar{x}r_q = (r_{qI} + r_{qII} + r_{qIII}) / 3 \quad (4.13)$$

kde je:

$\bar{x}r_q$... průměrná hodnota korekčních koeficientů pro veličinu q [1]

$r_{qI}, r_{qII}, r_{qIII}$... koeficienty veličiny q pro podmínky I, II, III [1]

Tab. 4.12: Korekční koeficienty pro veličiny F_d , E_w , P_m

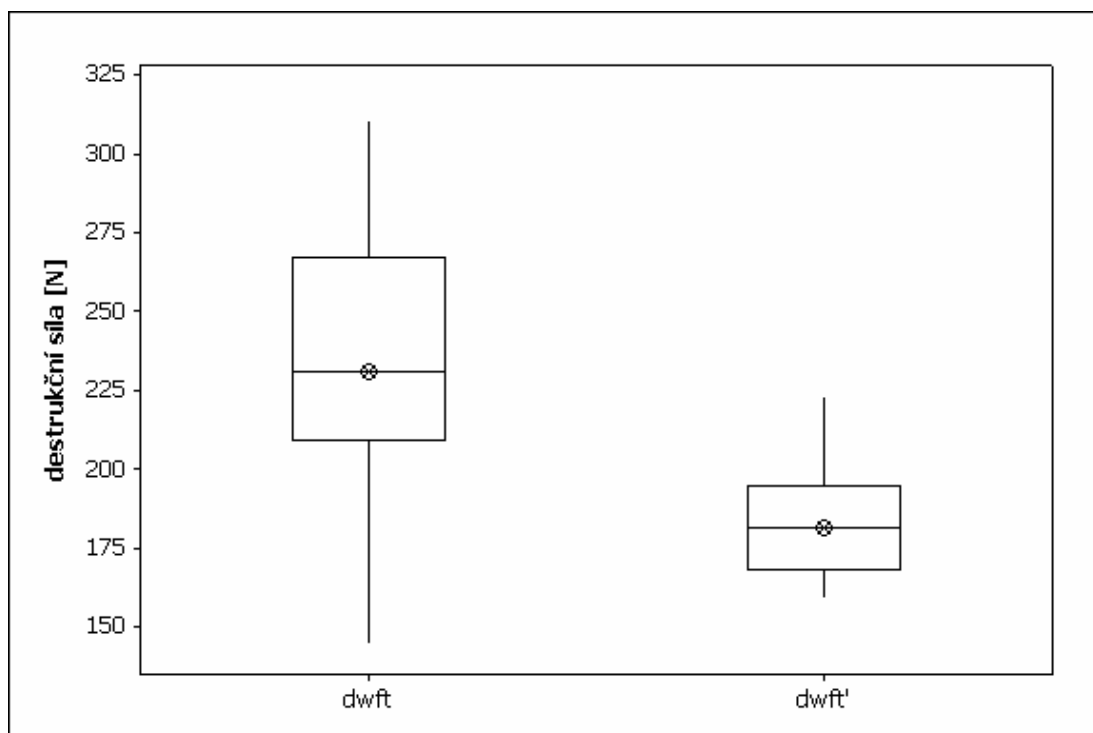
	F_d [J]			E_w [J]			P_m [W]		
	podmínky svařování			podmínky svařování			podmínky svařování		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
$\bar{x}(d_{wft})$	183,9	207,9	183,7	64,4	88,3	119,1	569	414	230
$\bar{x}(d_{wft})$	230,9	271,4	260,7	81,5	109,3	165,3	530	367,2	203
$\bar{x}(d_{wft}) - \bar{x}(d_{wft})$	-47,0	-63,5	-77,0	-17,1	-21,1	-46,2	39	47	28
	r_{FdI}	r_{FdII}	r_{FdIII}	r_{EwI}	r_{EwII}	r_{EwIII}	r_{PmI}	r_{PmII}	r_{PmIII}
	0,797	0,766	0,705	0,791	0,807	0,721	1,074	1,127	1,136
	$\bar{x}r_{Fd} = 0,756$ [1]			$\bar{x}r_{Ew} = 0,773$ [1]			$\bar{x}r_{Pm} = 1,112$ [1]		

Podmínky svařování I ($K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μ m při d_{wft} a d_{wft}')

Naměřená střední hodnota při d_{wft}' oproti d_{wft} je u destrukční síly o 47 N nižší, u energie svařování o 17,1 J nižší, ale u okamžitého výkonu je o 39 W vyšší. Kruskal-Walisův test vykázal u všech tří veličin významné odlišnosti mezi porovnávanými daty (tab. 4.13), což je pro destrukční sílu patrné na krabicových grafech (obr. 4.33).

Tab. 4.13: p-hodnoty statistických metod pro podmínky svařování I

veličina	p-hodnota [1]		
	A-D		F-test/LN
	d_{wft}	d_{wft}'	
F_d	0,646	0,289	-/0,009
E_w	0,248	0,233	0/0,001
P_m	0,006	0,742	-/0,002


Obr. 4.33: Krabicové grafy F_d pro podmínky svařování I

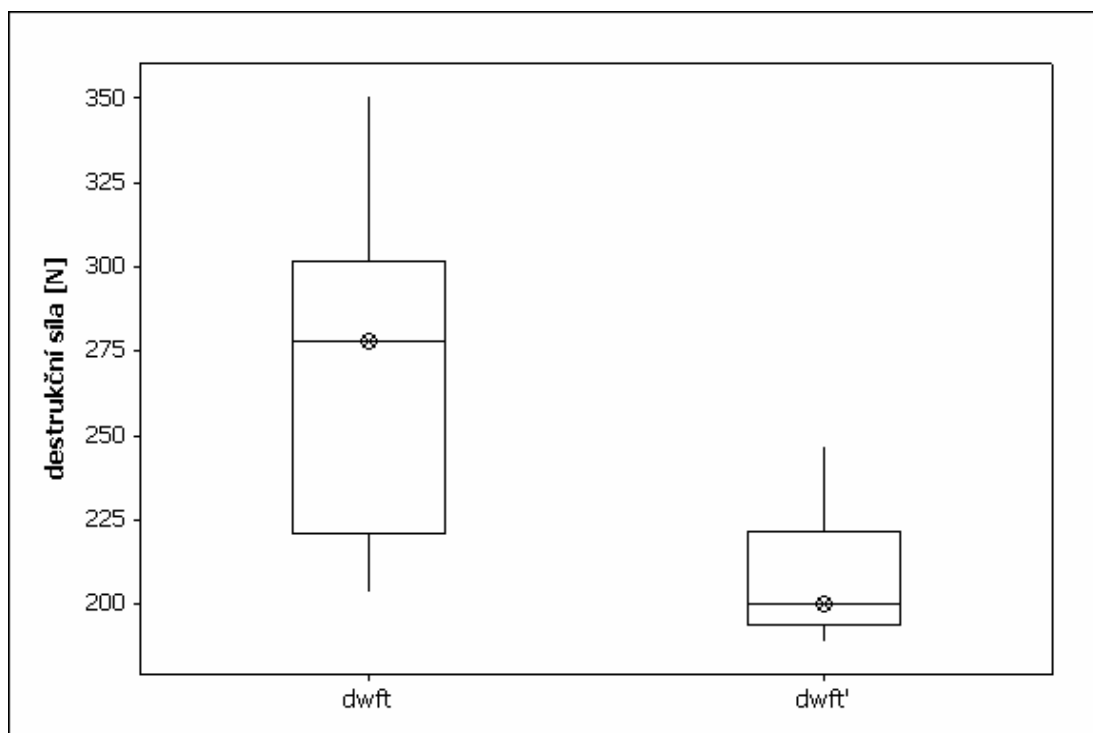
* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty

Podmínky svařování II ($K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm při d_{wft} a d_{wft}')

Naměřená střední hodnota při d_{wft}' oproti d_{wft} je u destrukční síly o 63,5 N nižší, u energie svařování o 21,1 J nižší, ale u okamžitého výkonu je o 47 W vyšší. Kruskal-Walisův test vykázal u všech tří veličin významné odlišnosti mezi porovnávanými daty (tab. 4.14), což je pro destrukční sílu patrné na krabicových grafech (obr. 4.34).

Tab. 4.14: p-hodnoty statistických metod pro podmínky svařování II

veličina	p-hodnota [1]		
	A-D		F-test/LN
	d_{wft}	d_{wft}'	
F_d	0,105	0,007	-/0,001
E_w	0,625	0,576	0,004/0,043
P_m	0,401	0,072	0,001/0,002


Obr. 4.34: Krabicové grafy F_d pro podmínky svařování II

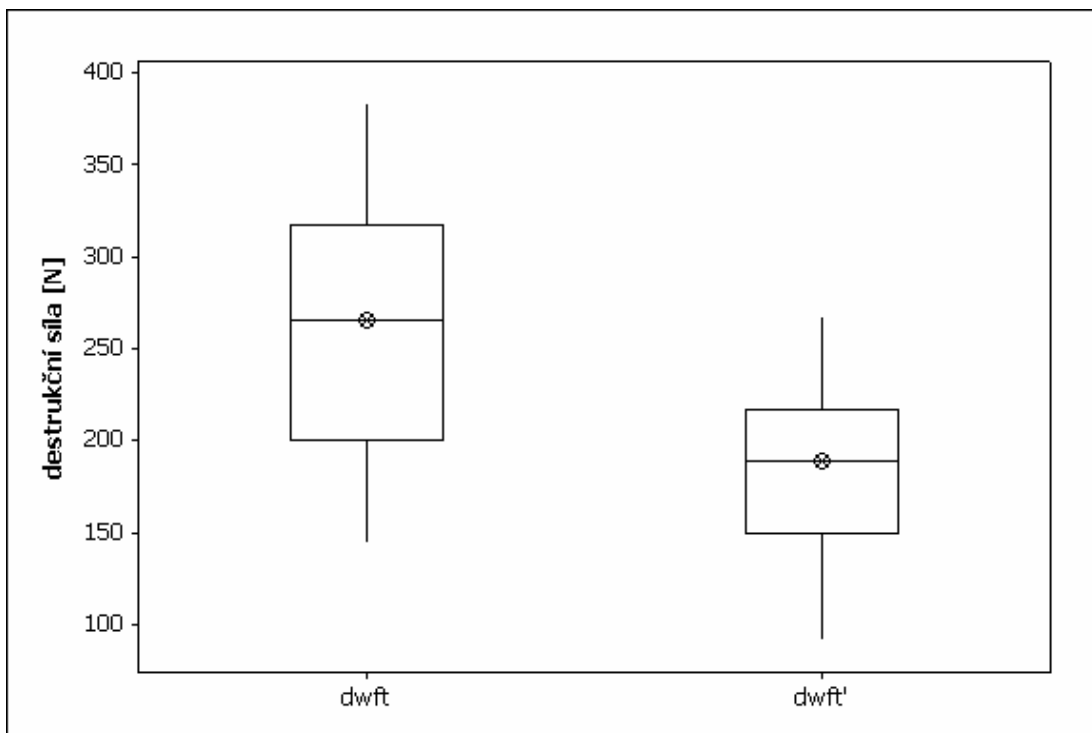
* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty

Podmínky svařování III ($K = 6$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 70$ μm při d_{wft} a d_{wft}')

Naměřená střední hodnota při d_{wft}' oproti d_{wft} je u destrukční síly o 77 N nižší, u energie svařování o 46,2 J nižší, ale u okamžitého výkonu je o 28 W vyšší. Podle Anovy jsou u všech tří veličin významné odlišnosti mezi porovnávanými daty (tab. 4.15), což je pro destrukční sílu patrné na krabicových grafech (obr. 4.35).

Tab. 4.15: p-hodnoty statistických metod pro podmínky svařování III

veličina	p-hodnota [1]			
	A-D		F-test/LN	AN/K-W
	d_{wft}	d_{wft}'		
F_d	0,868	0,643	0,104/0,053	0/-
E_w	0,051	0,240	0,062/0,009	0/0
P_m	0,186	0,413	0,573/0,192	0/-

Obr. 4.35: Krabicové grafy F_d pro podmínky svařování III

* odlehá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, \otimes značka střední hodnoty

Pro $d_{wft'}$:

Největší zjištěná odchylka d_{wf} od $d_{wft'}$ je $+6 \mu\text{m}$. Δd_u se pohybuje mezi 54 až $95 \mu\text{m}$. Δd_h je v rozsahu 182 až $201 \mu\text{m}$.

4.14.4 Dílčí závěr

Změna absolutní polohy sonotrody na konci fáze vlastního svařování $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$ o korekci $u = 0,075 \text{ mm}$ na hodnotu $d_{wft'} = 96,540 \text{ mm}$ pro neplněné série, která navozovala podmínky metody svařování na relativní vzdálenost, způsobila značné změny vybraných měřených veličin. Tyto změny jsou vyjádřeny dílčími korekční koeficienty r_{qj} , které vykazují určitý rozptyl pro různé podmínky svařování a proto se vypočítaly jejich aritmetické průměry \bar{x}_{r_q} . Změna nastavení z d_{wft} na $d_{wft'}$ vyvolala v průměru pokles pevnosti svaru o $24,4 \%$ ($\bar{x}_{r_F} = 0,756 [1]$), snížení energie svařování o $22,7 \%$ ($\bar{x}_{r_E} = 0,773 [1]$) a navýšení maximálního okamžitého výkonu sonotrody o $11,2 \%$ ($\bar{x}_{r_P} = 1,112 [1]$). Statistická analýza vykazovala odlišnost veličin F_d , E_w a P_m při svařování na $d_{wft'}$ a d_{wft} .

4.15 Měření vlivu změny stupně brzdění

Svařování probíhalo při konstantní svařovací amplitudě $A_w = 100\mu\text{m}$ s proměnlivou hodnotou stupně brzdění $K[1]$ při konstantním svařovacím tlaku $p_w = 15\text{ kPa}$, který byl shodně volen s konstantně nastaveným tlakem pro pohyb sonotrody do místa svaru p_{ds} . Nedochozelo tak ke skokovému přepínání hodnoty tlaku z p_{ds} na svařovací tlak p_w . Nastavení nízkého svařovacího tlaku umožnilo nastavit i vyšší svařovací rychlost, která byla snižována zvyšováním stupně brzdění od $K = 3 [1]$ po třech jednotkách až do hodnoty $K=15 [1]$. $K = 3 [1]$ bylo zvoleno s ohledem na předběžné zkoušky, kde tato hodnota vykazovala relativně konstantní průběh svařovací rychlosti. Hodnota $K = 15 [1]$ byla pro svařovací tlak $p_w = 15\text{ kPa}$ limitní hodnotou, protože se při ní začaly objevovat prasklinky mimo svar při destrukční zkoušce a docházelo také ke značnému poškození zkušebního tělíska 1 od sonotrody. Pro $K > 15 [1]$ byla již také svařovací rychlost velice nízká, téměř nulová a svařovací čas byl v řádech minut.

4.15.1 Zpracované naměřené hodnoty

Naměřená data jsou uvedena v příloze 6 a zpracované hodnoty uvedeny v tabulce 4.16 až 4.20 s definovanými parametry svařování.

Tab. 4.16: $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_u [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	271,4	8,10	109,3	367	0,635	0,468	1,384	95,980	96,616	0,178	96,793
	s	45,2	0,01	17,8	19	0,010	0,064	0,202	0,011	0,001	0,010	0,009
	x_{max}	350,8	8,12	140,9	404	0,662	0,568	1,908	95,995	96,621	0,193	96,808
	x_{min}	203,3	8,08	73,3	333	0,620	0,325	1,103	95,953	96,615	0,160	96,776
	Δ	147,5	0,04	67,6	71	0,042	0,243	0,805	0,042	0,006	0,033	0,032
2	\bar{x}	155,6	8,09	123,6	346	0,609	0,496	1,265	96,006	96,615	0,186	96,801
	s	33,2	0,02	18,7	36	0,024	0,095	0,204	0,024	0,000	0,012	0,012
	x_{max}	206,0	8,13	155,2	399	0,663	0,662	1,587	96,056	96,616	0,206	96,822
	x_{min}	94,3	8,07	102,7	294	0,560	0,390	0,932	95,952	96,615	0,164	96,779
	Δ	111,7	0,06	52,5	105	0,103	0,272	0,655	0,104	0,001	0,042	0,043
4	\bar{x}	154,6	8,09	127,0	308	0,608	0,586	1,118	96,007	96,615	0,186	96,801
	s	28,2	0,02	35,3	17	0,013	0,159	0,337	0,013	0,000	0,011	0,011
	x_{max}	188,4	8,12	202,6	369	0,648	0,933	2,077	96,021	96,616	0,211	96,827
	x_{min}	83,3	8,05	71,1	287	0,594	0,287	0,660	95,967	96,615	0,176	96,791
	Δ	105,1	0,07	131,6	82	0,054	0,646	1,416	0,054	0,001	0,035	0,036
6	\bar{x}	122,3	8,10	96,4	321	0,594	0,435	1,394	96,021	96,615	0,190	96,805
	s	25,6	0,01	21,0	22	0,008	0,070	0,188	0,008	0,000	0,005	0,005
	x_{max}	167,6	8,12	160,0	362	0,607	0,649	1,659	96,031	96,616	0,200	96,815
	x_{min}	86,7	8,07	69,8	277	0,584	0,352	0,915	96,008	96,615	0,181	96,796
	Δ	80,9	0,05	90,2	85	0,023	0,297	0,744	0,023	0,001	0,019	0,019

Tab. 4.17: $K = 6$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_u [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	325,3	8,10	157,1	298	0,628	0,904	0,715	95,988	96,616	0,182	96,798
	s	55,9	0,01	21,5	32	0,031	0,169	0,122	0,030	0,002	0,013	0,013
	x_{max}	418,0	8,11	201,2	361	0,735	1,173	1,056	96,026	96,622	0,202	96,817
	x_{min}	218,3	8,06	122,6	256	0,589	0,572	0,557	95,887	96,615	0,154	96,776
	Δ	199,7	0,05	78,6	105	0,146	0,601	0,499	0,139	0,007	0,048	0,041
2	\bar{x}	209,9	8,06	167,9	277	0,610	0,933	0,663	96,005	96,616	0,209	96,825
	s	27,4	0,01	24,3	8	0,022	0,116	0,080	0,022	0,001	0,007	0,008
	x_{max}	267,2	8,08	221,6	291	0,648	1,199	0,858	96,042	96,618	0,221	96,836
	x_{min}	179,6	8,04	122,1	263	0,573	0,737	0,532	95,967	96,615	0,195	96,810
	Δ	87,6	0,04	99,5	28	0,075	0,462	0,325	0,075	0,003	0,026	0,026
4	\bar{x}	153,5	8,07	153,3	289	0,592	0,773	0,815	96,024	96,615	0,210	96,615
	s	34,8	0,01	44,3	17	0,016	0,188	0,215	0,016	0,001	0,011	0,001
	x_{max}	204,0	8,10	228,6	333	0,633	1,060	1,196	96,043	96,619	0,225	96,619
	x_{min}	82,0	8,05	91,0	269	0,572	0,490	0,558	95,982	96,615	0,185	96,615
	Δ	122,0	0,05	137,6	64	0,061	0,570	0,637	0,061	0,004	0,040	0,004
6	\bar{x}	164,0	8,07	140,6	277	0,595	0,848	0,754	96,020	96,616	0,206	96,821
	s	38,3	0,01	28,1	24	0,020	0,201	0,239	0,020	0,001	0,010	0,010
	x_{max}	221,0	8,11	174,7	315	0,638	1,059	1,333	96,052	96,621	0,230	96,845
	x_{min}	81,0	8,05	79,4	222	0,563	0,426	0,569	95,983	96,615	0,183	96,798
	Δ	140,0	0,06	95,3	93	0,075	0,633	0,764	0,069	0,006	0,047	0,047

Tab. 4.18: $K = 9$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

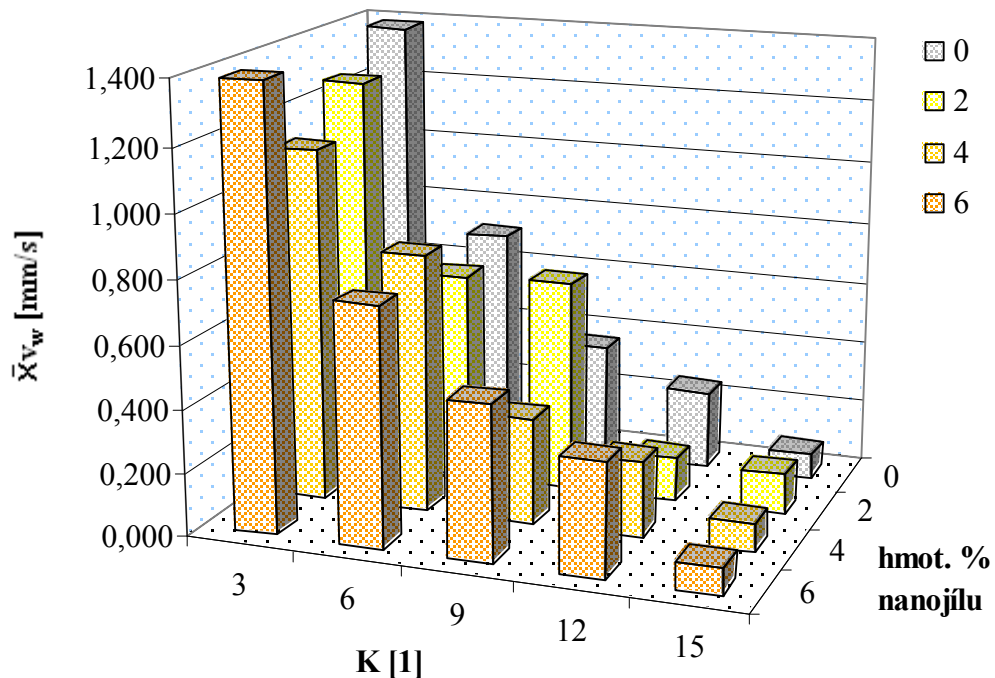
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_u [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	430,1	8,08	283,6	273	0,625	1,766	0,366	95,990	96,615	0,196	96,811
	s	56,8	0,01	65,5	11	0,012	0,341	0,067	0,012	0,000	0,013	0,013
	x_{max}	516,0	8,11	391,6	294	0,656	2,395	0,463	96,016	96,617	0,212	96,827
	x_{min}	326,4	8,06	203,8	249	0,599	1,369	0,258	95,959	96,615	0,175	96,790
	Δ	189,6	0,05	187,8	45	0,057	1,026	0,205	0,057	0,002	0,037	0,037
2	\bar{x}	208,6	8,07	154,6	278	0,595	0,890	0,673	96,021	96,615	0,204	96,819
	s	40,7	0,01	13,5	9	0,021	0,099	0,052	0,021	0,001	0,005	0,005
	x_{max}	286,8	8,10	180,4	297	0,628	1,155	0,762	96,054	96,617	0,213	96,828
	x_{min}	125,4	8,06	141,8	265	0,561	0,736	0,541	95,987	96,615	0,192	96,807
	Δ	161,4	0,04	38,7	32	0,067	0,419	0,221	0,067	0,002	0,021	0,021
4	\bar{x}	242,3	8,05	272,7	265	0,610	1,863	0,336	96,006	96,615	0,205	96,820
	s	33,0	0,01	41,3	22	0,021	0,300	0,062	0,021	0,001	0,005	0,005
	x_{max}	303,2	8,06	343,4	303	0,660	2,447	0,561	96,046	96,617	0,216	96,831
	x_{min}	169,0	8,04	175,8	229	0,569	1,014	0,258	95,955	96,615	0,198	96,813
	Δ	134,2	0,02	167,6	74	0,091	1,433	0,303	0,091	0,002	0,018	0,018
6	\bar{x}	195,0	8,07	192,0	284	0,600	1,258	0,491	96,016	96,615	0,205	96,821
	s	24,5	0,01	25,1	26	0,014	0,207	0,093	0,014	0,000	0,005	0,005
	x_{max}	227,3	8,08	238,8	317	0,643	1,527	0,708	96,034	96,616	0,214	96,829
	x_{min}	146,0	8,05	142,3	224	0,581	0,833	0,399	95,972	96,615	0,196	96,811
	Δ	81,3	0,03	96,5	93	0,062	0,694	0,309	0,062	0,001	0,018	0,018

Tab. 4.19: $K = 12$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

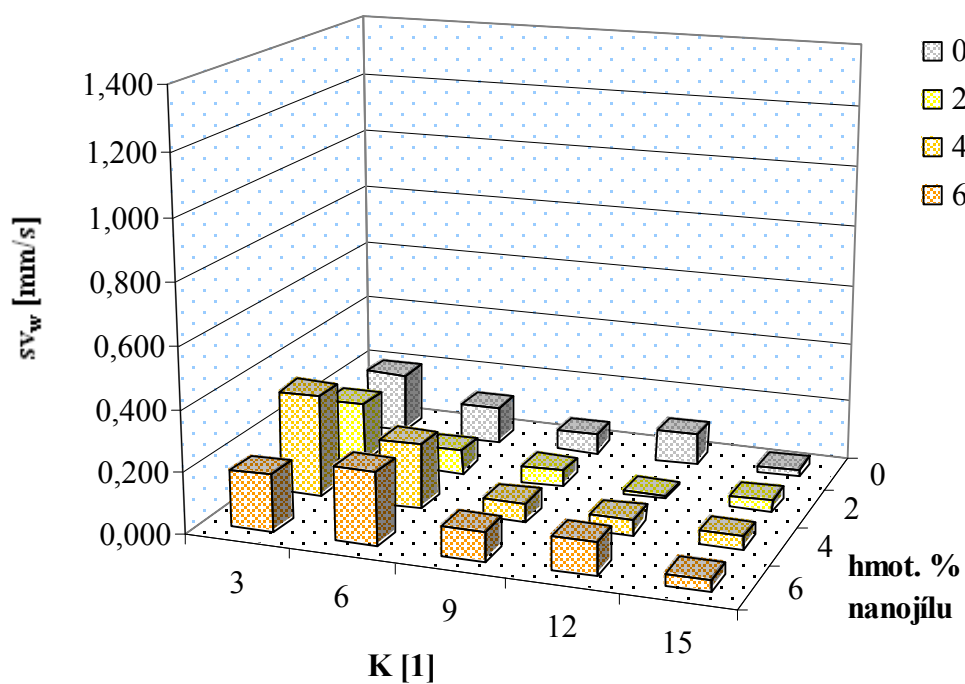
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_u [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	466,1	8,08	447,0	261	0,612	3,128	0,249	96,003	96,615	0,212	96,827
	s	53,1	0,01	214,4	21	0,015	1,701	0,106	0,015	0,001	0,027	0,027
	x_{max}	600,0	8,09	785,5	304	0,632	5,935	0,385	96,038	96,617	0,264	96,879
	x_{min}	380,4	8,06	238,2	225	0,577	1,565	0,106	95,983	96,615	0,180	96,795
	Δ	219,6	0,03	547,3	79	0,055	4,370	0,279	0,055	0,002	0,084	0,084
2	\bar{x}	318,8	8,03	612,4	271	0,609	4,405	0,139	96,006	96,615	0,217	96,832
	s	40,1	0,02	92,6	19	0,017	0,435	0,013	0,016	0,000	0,013	0,013
	x_{max}	376,8	8,06	780,1	310	0,648	5,230	0,164	96,036	96,616	0,241	96,856
	x_{min}	211,0	8,01	484,4	232	0,579	3,629	0,116	95,968	96,615	0,196	96,811
	Δ	165,8	0,05	295,6	78	0,069	1,601	0,049	0,068	0,001	0,045	0,045
4	\bar{x}	252,4	8,06	378,0	283	0,601	2,592	0,242	96,015	96,615	0,202	96,817
	s	33,1	0,01	67,2	24	0,015	0,550	0,053	0,015	0,000	0,006	0,006
	x_{max}	311,6	8,07	508,0	322	0,635	3,425	0,353	96,043	96,616	0,213	96,828
	x_{min}	183,6	8,04	263,2	237	0,572	1,671	0,180	95,980	96,615	0,190	96,805
	Δ	128,0	0,03	244,7	85	0,063	1,754	0,174	0,063	0,001	0,023	0,023
6	\bar{x}	195,5	8,07	310,0	283	0,583	2,031	0,358	96,032	96,615	0,201	96,817
	s	30,1	0,02	199,0	26	0,012	1,425	0,107	0,012	0,000	0,008	0,008
	x_{max}	253,6	8,09	806,7	328	0,610	5,499	0,443	96,050	96,617	0,222	96,837
	x_{min}	146,7	8,02	187,7	229	0,565	1,281	0,107	96,007	96,615	0,189	96,804
	Δ	106,9	0,07	619,1	99	0,045	4,218	0,336	0,043	0,002	0,033	0,033

Tab. 4.20: $K = 15$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{wft} = 96,615$ mm

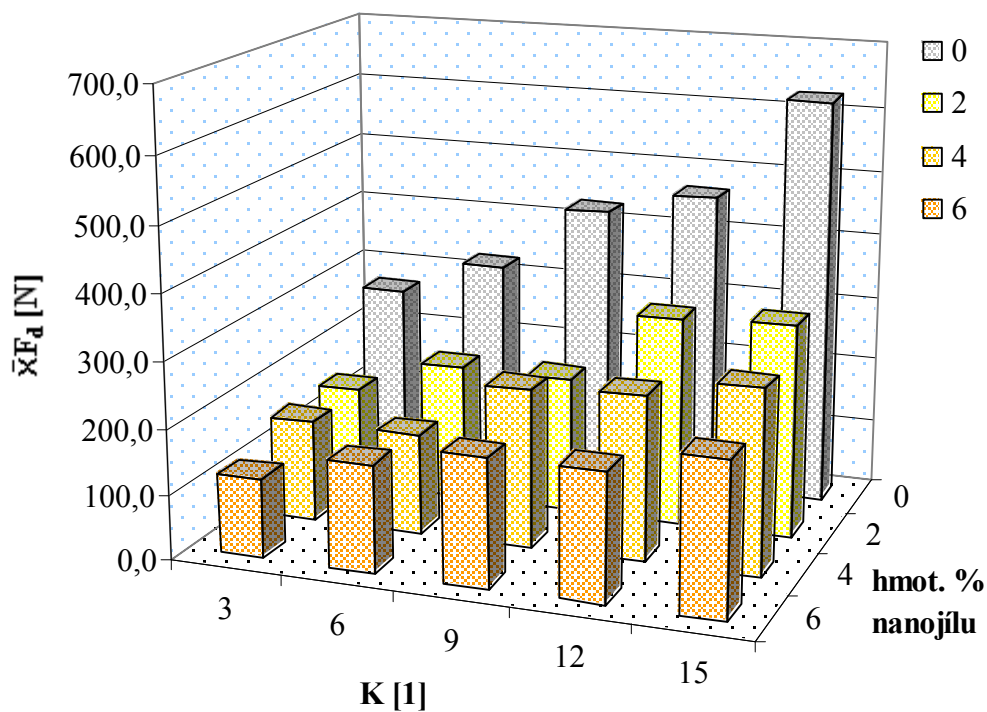
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{d1} [mm]	d_{wef} [mm]	d_{d1} [mm]	d_{wef} [mm]
0	\bar{x}	625,4	8,00	1269,0	278	0,629	8,490	0,081	95,986	96,615	0,218	96,833
	s	238,8	0,04	478,6	30	0,026	2,753	0,023	0,026	0,000	0,047	0,047
	x_{max}	869,0	8,06	2053,0	348	0,672	13,757	0,136	96,030	96,615	0,331	96,946
	x_{min}	139,7	7,93	640,5	238	0,585	4,654	0,048	95,943	96,615	0,158	96,773
	Δ	729,3	0,13	1412,5	110	0,087	9,103	0,088	0,087	0,000	0,173	0,173
2	\bar{x}	326,1	8,03	764,2	283	0,601	5,186	0,130	96,014	96,615	0,185	96,800
	s	75,4	0,01	306,0	26	0,019	2,150	0,038	0,019	0,000	0,009	0,009
	x_{max}	492,5	8,05	1379,8	347	0,660	9,677	0,169	96,037	96,616	0,203	96,818
	x_{min}	232,8	8,00	479,8	247	0,578	3,418	0,065	95,955	96,615	0,170	96,785
	Δ	259,7	0,05	900,0	100	0,082	6,259	0,104	0,082	0,001	0,033	0,033
4	\bar{x}	282,0	8,02	1101,2	288	0,613	8,194	0,092	96,002	96,615	0,195	96,810
	s	78,8	0,02	363,4	28	0,029	3,355	0,044	0,029	0,001	0,029	0,029
	x_{max}	486,0	8,05	1778,6	334	0,677	12,819	0,170	96,056	96,617	0,306	96,921
	x_{min}	38,3	7,97	580,7	231	0,559	3,391	0,051	95,938	96,615	0,174	96,789
	Δ	447,7	0,08	1197,9	103	0,118	9,428	0,119	0,118	0,002	0,132	0,132
6	\bar{x}	233,5	8,03	1197,2	285	0,609	8,579	0,085	96,006	96,615	0,193	96,808
	s	59,4	0,02	539,5	21	0,017	3,450	0,039	0,017	0,000	0,029	0,029
	x_{max}	314,4	8,07	2346,1	337	0,654	14,900	0,186	96,050	96,616	0,311	96,926
	x_{min}	18,7	7,99	530,9	244	0,565	3,087	0,040	95,961	96,615	0,167	96,782
	Δ	295,7	0,08	1815,2	93	0,089	11,813	0,146	0,089	0,001	0,144	0,144



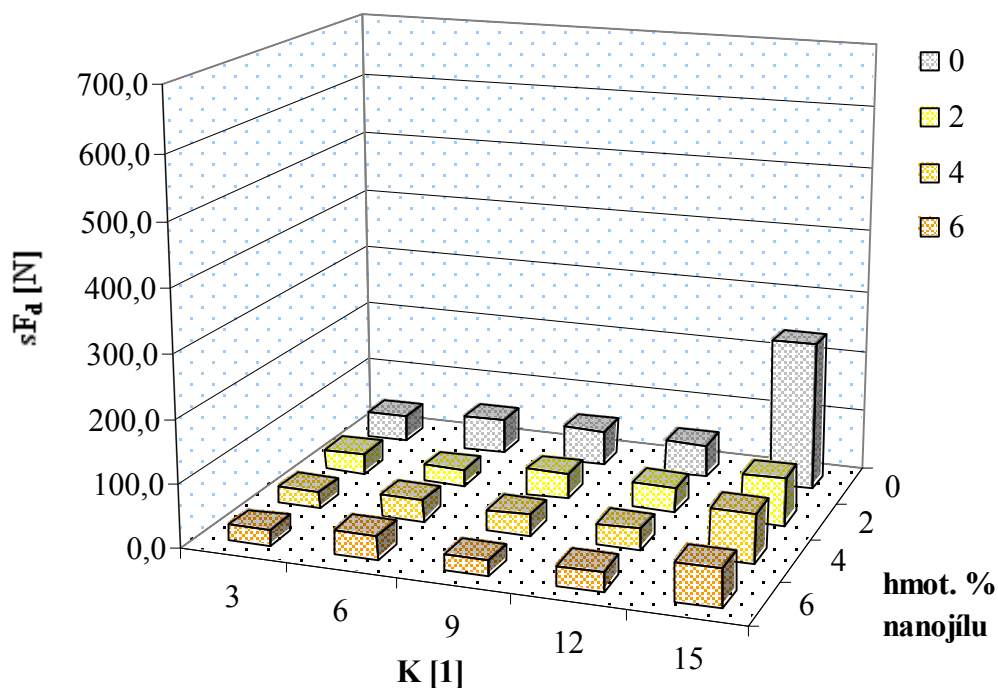
Obr. 4.36: Graf závislosti \bar{x}_{v_w} na hmotnostním procentu nanojílu a stupni brzdění K



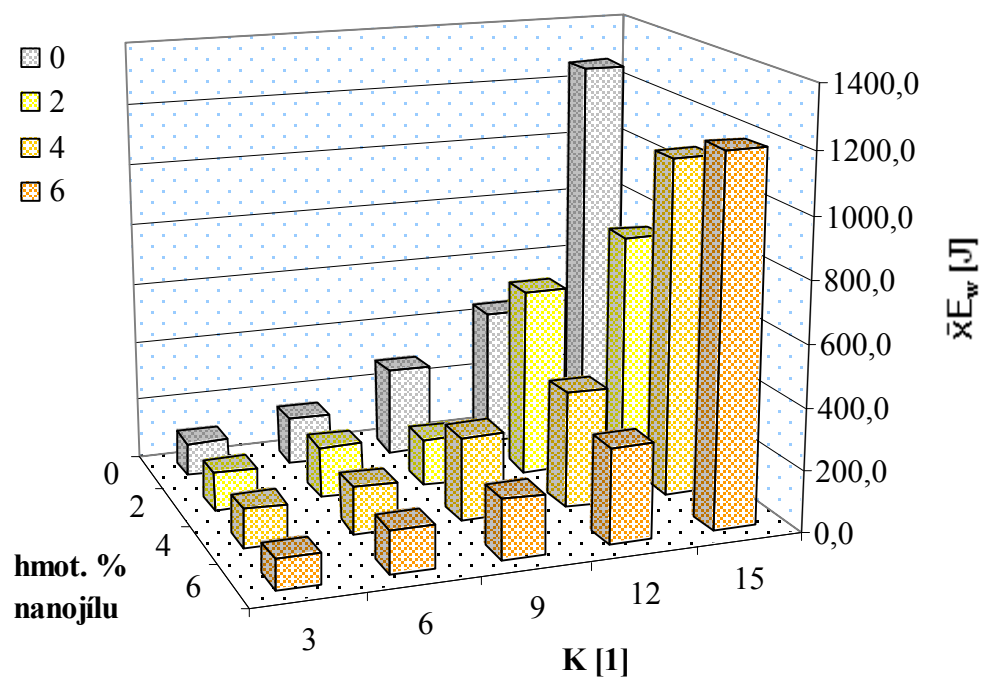
Obr. 4.37: Graf závislosti sv_w na hmotnostním procentu nanojílu a stupni brzdění K



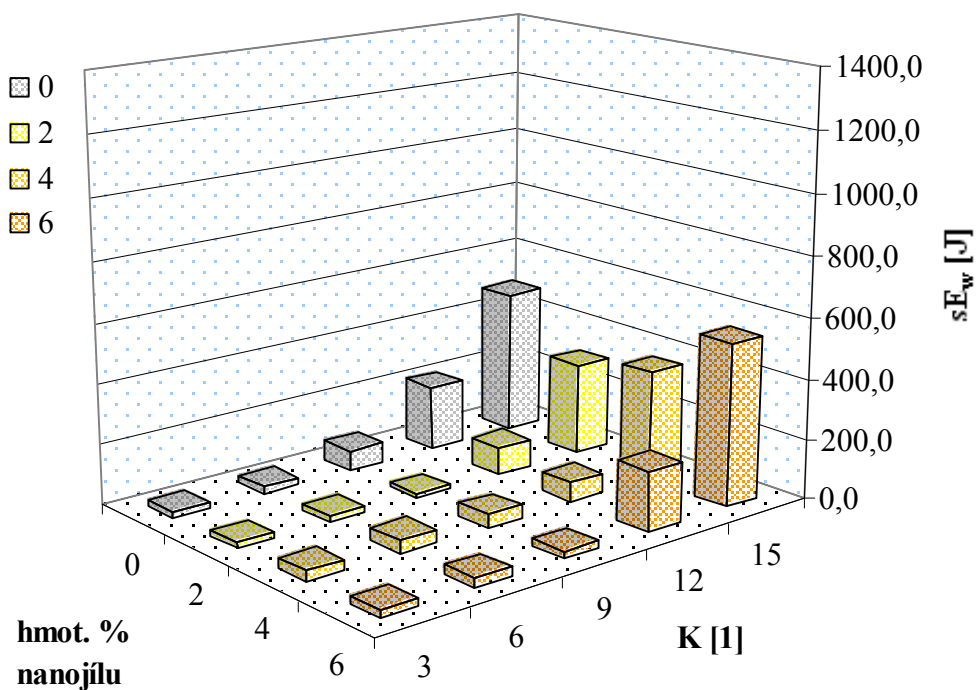
Obr. 4.38: Graf závislosti $\bar{X}F_d$ na hmotnostním procentu nanojílu a stupni brzdění K



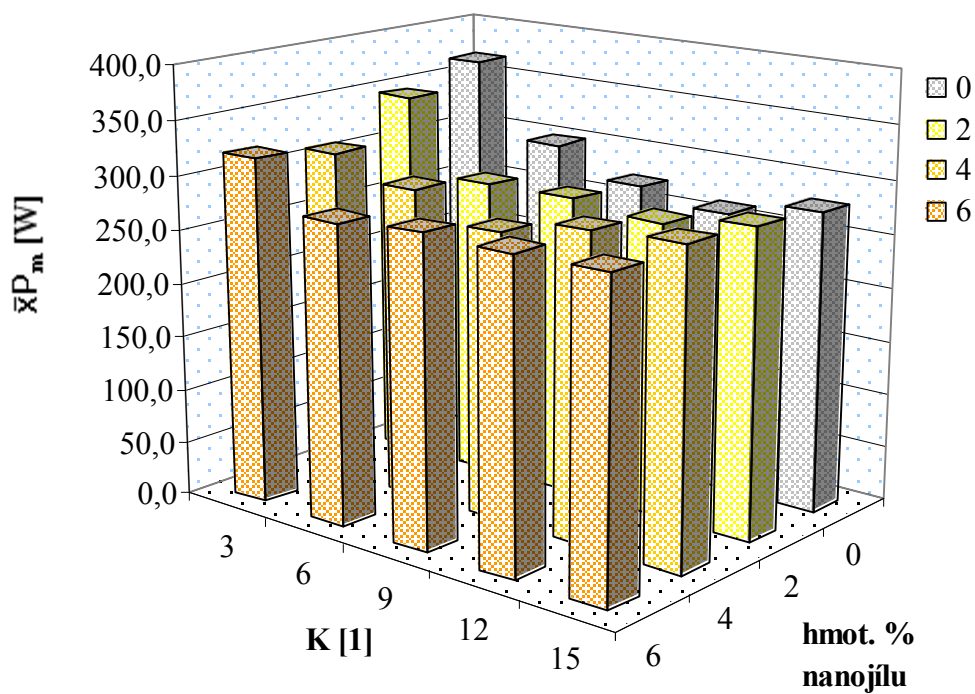
Obr. 4.39: Graf závislosti sF_d na hmotnostním procentu nanojílu a stupni brzdění K



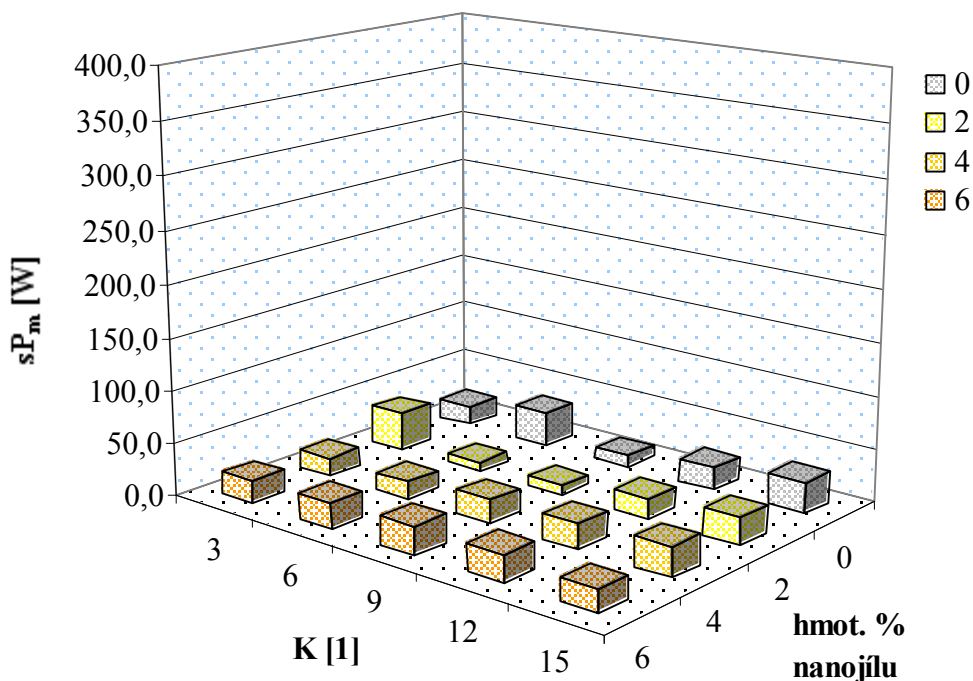
Obr. 4.40: Graf závislosti $\bar{x}E_w$ na hmotnostním procentu nanojílu a stupni brzdění K



Obr. 4.41: Graf závislosti sE_w na hmotnostním procentu nanojílů a stupni brzdění K



Obr. 4.42: Graf závislosti $\bar{x}P_m$ na hmotnostním procentu nanojílů a stupni brzdění K



Obr. 4.43: Graf závislosti sP_m na hmotnostním procentu nanojílu a stupni brždění K

4.15.2 Vyhodnocení

Průměrná svařovací rychlost v_w

Střední hodnota průměrné svařovací rychlosti $\bar{x}v_w$, která byla hlavním svařovacím parametrem, při konstantním svařovacím tlaku $p_w = 15$ kPa se zvyšujícím se stupněm brždění K[1] klesá (obr. 4.36). Protože $\bar{x}v_w$ nebyla ani přes užití hydraulického brždění konstantní mezi jednotlivými sériemi s různou koncentrací nanojílu, vypočítal se aritmetický průměr $\bar{X}v_w$ z rychlostí $\bar{x}v_w$ ze všech sérií při daném K, který se pohybuje od 1,290 mm/s pro K = 3 [1] až do 0,097 mm/s pro K = 15 [1].

Destrukční síla F_d

U naměřených dat je viditelný trend poklesu střední hodnoty destrukční síly $\bar{x}F_d$ s narůstajícím hmotnostním procentem nanojílu a zvyšující se průměrnou svařovací rychlostí, resp. snižujícím se stupněm brždění (obr. 4.38). Pro neplněný polypropylen a vysoký stupeň brždění K = 15 [1] byla vypočítána střední hodnota destrukční síly

625,4 N a pro plněný polypropylen s 6% nanojílů při nízkém stupni brzdění $K = 3$ [1] byla zjištěna střední hodnota destrukční síly 122,3 N.

Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly $\bar{X}F_d$ pro $K=15$ [1] a $K= 3$ [1] se pro jednotlivé koncentrace nanojílů 0% až 6% pohybuje od 1,82 do 2,30. Poměr mezi hodnotou $\bar{X}F_d$ pro 0% a 6% nanojílů pro jednotlivé nastavované stupně brzdění je v rozsahu 1,98 až 2,68. Hodnoty výběrových směrodatných odchylek se mezi sebou nijak výrazně neodlišují až na měření v sérii 0% pro $K = 15$ [1], kde je vidět značný nárůst odchylky, který je pravděpodobně způsobený silným poškozením tělíska 1 sonotrodou (obr. 4.39).

Statistická analýza dat destrukční síly pro konstantní koncentrace (řádky v tab. 4.21) a stupně brzdění (sloupce v tab. 4.21) vykazala závislost destrukční síly na koncentraci nanojílů i stupni brzdění, resp. svařovací rychlosti (viz. tab. 4.21). Mnohonásobným porovnáváním byla zjištěna shodnost destrukční síly při stupních brzdění 3 - 6 a 12 - 15 pro všechny koncentrace nanojílů (viz. tab. 4.22). Další shoda destrukční síly pro všechny stupně brzdění byla nalezena mezi sériemi se 2 % a 4 % nanojílů (viz. tab. 4.23).

Tab. 4.21: p-hodnoty metod statistické analýzy pro F_d

hmot. % nanojilu	p-hodnota [1]						
	A-D					BT / LN	AN / K-W
	K [1]						
	3	6	9	12	15		
0	0,105	0,382	0,548	0,807	0	-/0	- /0
2	0,220	0	0,861	0,030	0,020	-/0,013	- /0
4	0,083	0,457	0,320	0,837	0	0/0,230	- /0
6	0,186	0,119	0,017	0,321	0	0/0,272	- /0
BT / LN 0-6%	0,051/ 0,076	-/ 0,041	0,002/ 0,005	-/ 0,139	-/0	-	-
AN/ K-W 0-6%	0/-	-/0	-/0	- / 0	-/0	-	-

Tab. 4.22: Výsledky mnohonásobného porovnávání statistickými metodami pro data v tab. 4.21 - konstantní koncentrace plniva a proměnlivý stupeň brzdění pro F_d

	hmot. % nanojálu															
	0				2				4				6			
K [1]	<u>3</u>	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>12</u>	<u>3</u>	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>12</u>	<u>3</u>	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>12</u>	<u>3</u>	<u>6</u>	<u>9</u>	<u>12</u>
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	•	-	-	-	•	-	-	-	•	-	-	-	•	-	-	-
9			-	-	•	•	-	-			-	-		•	-	-
12			•	-				-			•	-		•	•	-
15			•	•				•			•	•			•	•

“•” značka shodnosti skupin ; “_” značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami; uvedena pouze ½ porovnávacího pole pro danou hodnotu faktoru

Tab. 4.23 Výsledky mnohonásobného porovnávání statistickými metodami pro data v tab. 4.21 - konstantní stupeň brzdění a proměnlivá koncentrace plniva pro F_d

	K [1]															
	3				6				9				12			
hmot. % nanojálu	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2		-	-		-	-		-	-		-	-		•	-	-
4		•	-			-		•	-		•	-		•	-	-
6						•		•				•				•

“•” značka shodnosti skupin ; “_” značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami; uvedena pouze ½ porovnávacího pole pro danou hodnotu faktoru

Energie svařování E_w

Střední hodnota energie svařování $\bar{X}E_w$ dodaná tělískům nevykazuje závislost na koncentraci nanojálu. Pro nižší stupně brzdění, resp. vyšší svařovací rychlost se její hodnoty liší mezi sériemi s různou koncentrací nanojálu minimálně, ale s narůstajícím stupněm brzdění se projevují větší rozdíly mezi středními hodnotami (obr. 4.40). Aritmetický průměr středních hodnot energie svařování ze všech koncentrací pro daný stupeň brzdění $\bar{X}E_w$ se zvyšuje od 114,1 J pro $K = 3$ [1] až na hodnotu 1082,9 J pro $K = 15$ [1], tj. pro rozsah svařovací rychlosti $\bar{X}v_w$ od 1,290 mm/s do 0,097 mm/s. Poměr mezi střední hodnotou energie svařování $\bar{X}E_w$ pro $K=15$ [1] a $K= 3$ [1] pro jednotlivé koncentrace 0% až 6% se pohybuje od 6,18 do

12,41. Poměr mezi hodnotou $\bar{X}E_w$ pro 0% a 6% plniva pro jednotlivé nastavované stupně brzdění $K=3$ [1] až $K=15$ [1] je v rozsahu od 1,06 do 1,44. Výběrové směrodatné odchylky se zvyšují s rostoucí energií svařování (obr. 4.41).

Maximální okamžitý výkon P_m

Střední hodnota okamžitého výkonu sonotrody $\bar{X}P_m$ vykazuje pro data naměřená při $K=3$ [1] navýšení v rozsahu 28,9 až 87,6 W oproti aritmetickému průměru 280W počítaného ze všech středních hodnot výkonu ostatních stupňů brzdění (obr. 4.42). Objevu je se tedy skokový pokles výkonu v při poklesu svařovací rychlosti. Střední hodnota výkonu $\bar{X}P_m$ nevykazuje závislost na koncentraci nanojílů. Poměr mezi střední hodnotou výkonu $\bar{X}P_m$ pro $K=15$ [1] a $K=3$ [1] se pro jednotlivé koncentrace nanojílů 0% až 6% pohybuje od 0,76 do 0,93. Poměr mezi hodnotou $\bar{X}P_m$ pro 0% a 6% plniva pro jednotlivé nastavované stupně brzdění je v rozsahu od 0,92 do 1,15.

Největší zjištěná odchylka d_{wf} od d_{wft} je $+7\text{ }\mu\text{m}$. Δd_u se pohybuje mezi 23 až 139 μm . $\bar{X}d_h$ je v rozsahu 178 až 218 μm .

4.15.3 Dílčí závěr

Zvyšování stupně brzdění při konstantním svařovacím tlaku způsobuje snižování svařovací rychlosti, což vede k nárůstu energie svařování dodané svařovaným tělískům a více energie dopravené do místa svaru zvýší tavení materiálu v oblasti svarových ploch, což způsobí nárůst pevnosti svarového spoje. Střední hodnoty maximálního okamžitého výkonu sonotrody jsou pro stupeň brzdění $K=3$ [1] vyšší oproti hodnotám pro ostatní vyšší stupně brzdění, které lze považovat za shodné.

Nárůst procenta nanojílů způsobuje pokles hodnoty destrukční síly. Při svařování na konstantní výšku svařence je pokles destrukční síly mezi neplněnou sérií a plněnými sériemi značný, kde velkou část změny způsobuje zmenšení tloušťky zkušebních tělísek vlivem plniva při vstřikování za neměnných podmínek vstřikování. Vliv procenta nanojílů na hodnotu energie svařování a hodnotu maximálního okamžitého výkonu není z naměřených dat patrný.

Statistická analýza zjistila závislost destrukční síly na stupni brždění K a na hmot. % nanojílu. Byla nalezena shodnost destrukční síly při stupních brždění 3 - 6 a 12 - 15 pro všechny koncentrace nanojílu. Destrukční síla se také shoduje pro série 2 % a 4% nanojílu pro všechny stupně brždění.

4.16 Měření vlivu změny svařovacího tlaku

Měření vlivu změny svařovacího tlaku navázalo na měření vlivu změny stupně brždění v souvislosti se svařovací rychlostí, kterou bylo možné zvýšit při nízkém stupni brždění zvýšením svařovacího tlaku. Při konstantním stupni brždění $K = 3$ [1] se zvyšoval svařovací tlak p_w od hodnoty 15 kPa do 600 kPa. Hodnota maximálního použitého svařovacího tlaku, která byla daná možnostmi použitého tlakového zdroje vzduchu, byla o 90 kPa nižší než dovoľovalo užít svařovací zařízení. Měření se uskutečnilo pro všechny koncentrace nanojílu při postupně nastavovaném svařovacím tlaku 15 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 300 kPa a 600 kPa.

4.16.1 Zpracovaná naměřená data

Změřené hodnoty pro podmínky $p_w = 50$ až 600 kPa; $K = 3$ [1]; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$ jsou uvedeny v příloze 7. Data pro $p_w = 15 \text{ kPa}$; $K = 3$ [1]; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$ byla do grafů a pro statistickou analýzu převzata z tabulky 4.16 až 4.20 (kapitola 4.15) a z přílohy 6.

Tab. 4.24: $K = 3 [1]$; $p_w = 50 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$

hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	230,9	8,10	81,5	530	0,613	0,270	2,289	96,003	96,616	0,179	96,795
	s	43,6	0,03	8,0	39	0,028	0,025	0,197	0,028	0,001	0,011	0,011
	x_{max}	310,8	8,15	95,3	588	0,671	0,298	2,614	96,055	96,618	0,203	96,820
	x_{min}	145,1	8,05	67,5	467	0,562	0,215	1,997	95,944	96,615	0,165	96,781
	Δ	165,7	0,10	27,8	121	0,109	0,083	0,617	0,111	0,003	0,038	0,039
2	\bar{x}	148,7	8,10	66,5	476	0,597	0,249	2,398	96,019	96,616	0,190	96,806
	s	28,4	0,04	4,1	24	0,013	0,010	0,105	0,013	0,001	0,012	0,012
	x_{max}	205,3	8,16	72,8	540	0,622	0,262	2,579	96,044	96,618	0,210	96,827
	x_{min}	106,4	8,04	59,7	444	0,572	0,232	2,250	95,994	96,615	0,169	96,785
	Δ	98,9	0,12	13,1	96	0,050	0,030	0,329	0,050	0,003	0,041	0,042
4	\bar{x}	115,0	8,08	60,3	466	0,589	0,235	2,510	96,028	96,617	0,200	96,817
	s	19,0	0,03	4,7	32	0,011	0,014	0,137	0,010	0,001	0,015	0,015
	x_{max}	152,4	8,12	67,2	505	0,608	0,259	2,740	96,045	96,619	0,221	96,837
	x_{min}	84,3	8,03	51,4	402	0,570	0,208	2,311	96,009	96,615	0,178	96,795
	Δ	68,1	0,09	15,7	103	0,038	0,051	0,430	0,036	0,004	0,043	0,042
6	\bar{x}	90,0	8,10	54,7	455	0,579	0,220	2,650	96,037	96,616	0,205	96,821
	s	25,8	0,01	4,8	55	0,013	0,019	0,197	0,013	0,001	0,009	0,009
	x_{max}	126,6	8,12	63,9	558	0,601	0,248	2,984	96,067	96,618	0,220	96,836
	x_{min}	11,4	8,07	45,7	391	0,548	0,192	2,351	96,015	96,615	0,187	96,804
	Δ	115,2	0,05	18,1	167	0,053	0,056	0,634	0,052	0,003	0,033	0,032

Tab. 4.25: $K = 3 [1]$; $p_w = 100 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$

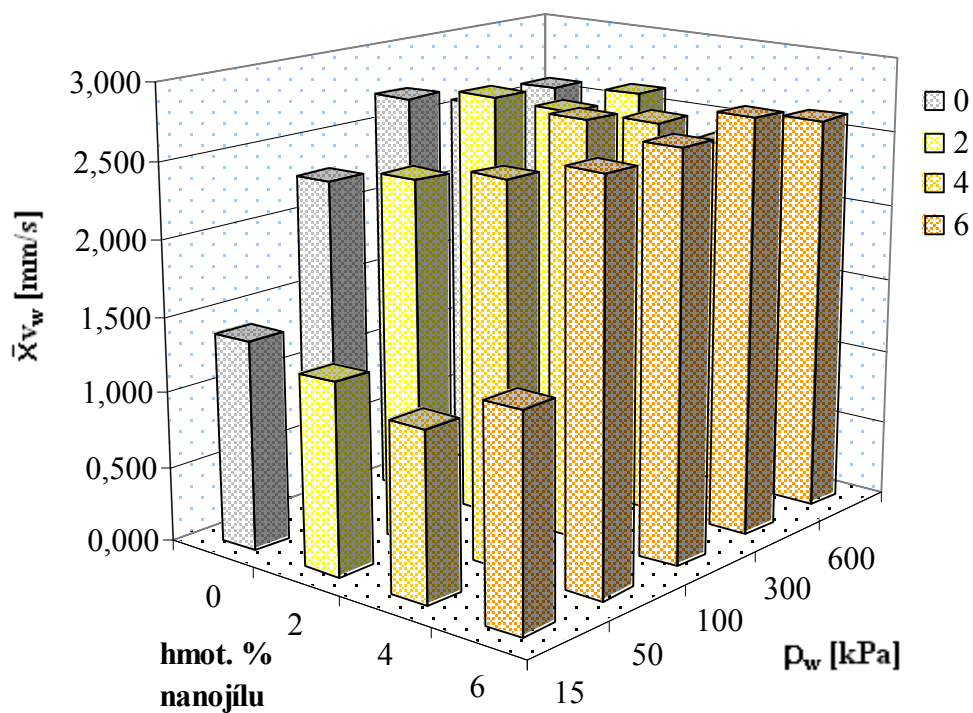
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	195,9	8,11	68,1	612	0,623	0,230	2,717	95,994	96,618	0,185	96,803
	s	21,4	0,03	3,0	12	0,011	0,008	0,073	0,010	0,003	0,011	0,012
	x_{max}	250,7	8,18	74,5	629	0,648	0,244	2,885	96,013	96,625	0,212	96,830
	x_{min}	160,0	8,01	63,2	581	0,605	0,217	2,566	95,972	96,615	0,167	96,784
	Δ	90,7	0,17	11,3	48	0,043	0,027	0,319	0,041	0,010	0,045	0,046
2	\bar{x}	113,1	8,14	57,5	567	0,610	0,217	2,816	96,007	96,617	0,188	96,805
	s	15,3	0,02	3,8	49	0,022	0,010	0,102	0,021	0,002	0,009	0,009
	x_{max}	149,4	8,18	63,8	627	0,645	0,234	2,990	96,041	96,621	0,203	96,819
	x_{min}	84,7	8,10	49,9	467	0,575	0,197	2,643	95,972	96,615	0,169	96,785
	Δ	64,7	0,08	13,9	160	0,070	0,037	0,347	0,069	0,006	0,034	0,034
4	\bar{x}	103,8	8,11	53,9	509	0,597	0,216	2,763	96,020	96,617	0,204	96,821
	s	14,4	0,02	2,8	12	0,017	0,009	0,077	0,017	0,002	0,007	0,007
	x_{max}	124,0	8,14	59,0	530	0,639	0,232	2,910	96,041	96,622	0,219	96,837
	x_{min}	74,0	8,08	49,0	476	0,574	0,201	2,599	95,977	96,615	0,189	96,806
	Δ	50,0	0,06	10,0	54	0,065	0,031	0,311	0,064	0,007	0,030	0,031
6	\bar{x}	83,3	8,10	53,3	494	0,598	0,224	2,686	96,019	96,617	0,197	96,814
	s	10,9	0,01	3,6	25	0,015	0,019	0,178	0,016	0,002	0,008	0,008
	x_{max}	105,0	8,12	60,5	563	0,631	0,254	2,956	96,047	96,621	0,207	96,828
	x_{min}	66,0	8,08	46,8	460	0,570	0,197	2,453	95,985	96,615	0,183	96,800
	Δ	39,0	0,04	13,7	103	0,061	0,057	0,503	0,062	0,006	0,024	0,028

Tab. 4.26: $K = 3$ [1]; $p_w = 300$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

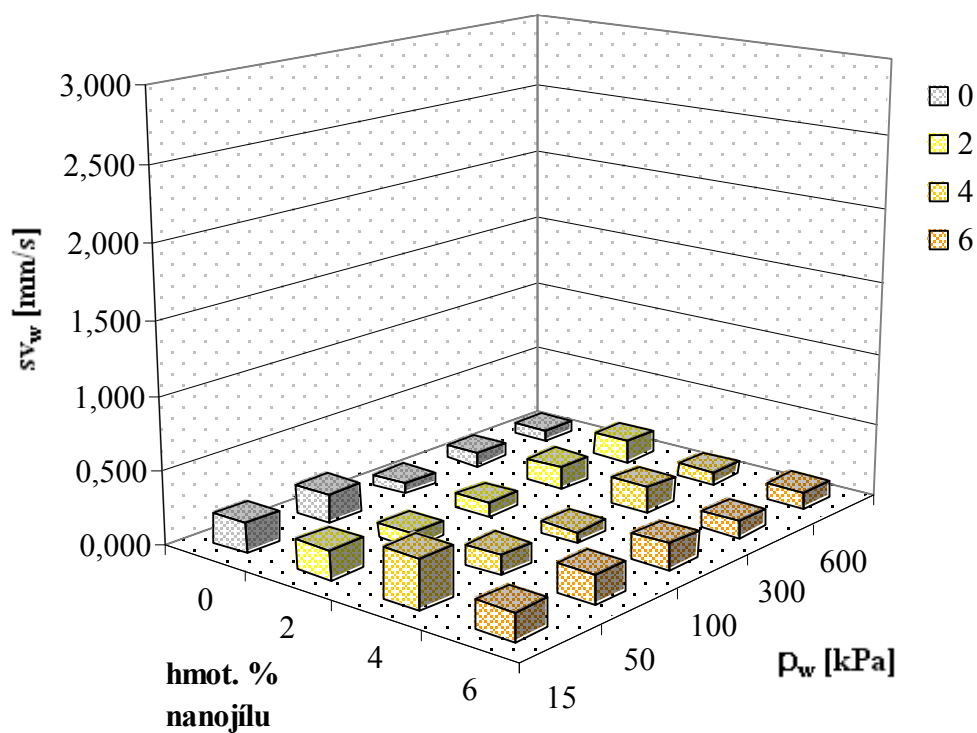
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	184,4	8,14	71,9	614	0,641	0,249	2,576	95,976	96,617	0,171	96,789
	s	36,7	0,02	3,3	24	0,015	0,010	0,092	0,015	0,001	0,010	0,010
	x_{max}	264,7	8,18	77,7	641	0,661	0,269	2,714	96,004	96,620	0,197	96,813
	x_{min}	136,1	8,09	66,2	550	0,612	0,235	2,391	95,957	96,615	0,153	96,770
	Δ	128,6	0,09	11,6	91	0,049	0,034	0,323	0,047	0,005	0,044	0,043
2	\bar{x}	123,0	8,13	61,1	564	0,623	0,239	2,614	95,995	96,618	0,177	96,795
	s	21,6	0,02	4,2	57	0,028	0,016	0,158	0,028	0,002	0,014	0,014
	x_{max}	183,6	8,16	68,4	651	0,670	0,259	2,876	96,046	96,621	0,199	96,817
	x_{min}	86,3	8,10	52,2	449	0,571	0,210	2,386	95,947	96,615	0,155	96,772
	Δ	97,3	0,06	16,2	202	0,099	0,049	0,490	0,099	0,006	0,044	0,045
4	\bar{x}	104,1	8,11	55,4	508	0,604	0,230	2,632	96,013	96,617	0,194	96,811
	s	14,1	0,01	3,9	25	0,016	0,016	0,180	0,016	0,002	0,009	0,010
	x_{max}	132,3	8,13	62,5	550	0,629	0,257	3,020	96,049	96,621	0,209	96,824
	x_{min}	82,0	8,09	46,6	439	0,566	0,199	2,349	95,989	96,615	0,167	96,784
	Δ	50,3	0,04	15,8	111	0,063	0,058	0,670	0,060	0,006	0,042	0,040
6	\bar{x}	83,0	8,10	53,4	503	0,614	0,223	2,754	96,004	96,617	0,197	96,814
	s	17,3	0,01	2,6	30	0,021	0,008	0,118	0,020	0,002	0,004	0,004
	x_{max}	127,7	8,14	59,0	564	0,680	0,235	3,105	96,025	96,621	0,205	96,822
	x_{min}	58,0	8,08	48,0	467	0,594	0,205	2,604	95,938	96,615	0,191	96,806
	Δ	69,7	0,06	11,0	97	0,086	0,030	0,501	0,087	0,006	0,014	0,016

Tab. 4.27: $K = 3$ [1]; $p_w = 600$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

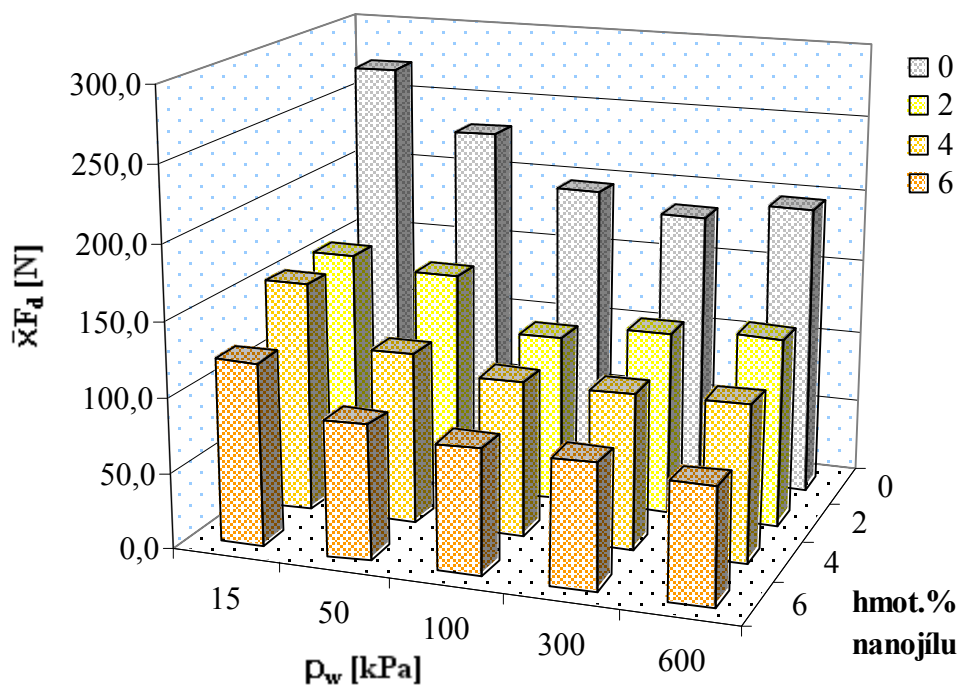
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	195,8	8,14	72,7	597	0,652	0,252	2,587	95,966	96,617	0,169	96,786
	s	37,6	0,03	3,3	34	0,030	0,007	0,076	0,028	0,002	0,011	0,011
	x_{max}	270,0	8,19	78,9	635	0,766	0,268	2,858	95,998	96,624	0,193	96,812
	x_{min}	141,0	8,08	67,2	533	0,619	0,237	2,490	95,858	96,615	0,151	96,768
	Δ	129,0	0,11	11,8	102	0,147	0,031	0,368	0,140	0,009	0,042	0,044
2	\bar{x}	126,9	8,13	61,0	565	0,628	0,239	2,628	95,990	96,618	0,178	96,796
	s	31,5	0,02	3,3	56	0,034	0,010	0,162	0,033	0,002	0,012	0,012
	x_{max}	219,8	8,17	65,5	639	0,762	0,256	3,036	96,017	96,624	0,200	96,818
	x_{min}	84,7	8,10	54,3	480	0,600	0,222	2,417	95,862	96,615	0,156	96,774
	Δ	135,1	0,07	11,2	159	0,162	0,034	0,619	0,155	0,009	0,044	0,044
4	\bar{x}	105,5	8,11	59,5	510	0,603	0,255	2,374	96,014	96,617	0,186	96,803
	s	18,9	0,01	3,9	39	0,010	0,011	0,087	0,010	0,002	0,006	0,007
	x_{max}	146,7	8,16	67,0	597	0,623	0,277	2,508	96,032	96,621	0,195	96,814
	x_{min}	75,7	8,09	54,1	471	0,587	0,239	2,242	95,995	96,615	0,171	96,788
	Δ	71,0	0,07	12,9	126	0,036	0,038	0,266	0,037	0,006	0,024	0,026
6	\bar{x}	77,0	8,10	55,9	516	0,621	0,237	2,626	95,996	96,617	0,190	96,808
	s	8,5	0,01	3,4	34	0,023	0,007	0,113	0,023	0,002	0,006	0,007
	x_{max}	95,0	8,12	63,5	571	0,680	0,249	2,928	96,023	96,621	0,206	96,827
	x_{min}	60,0	8,08	48,5	461	0,593	0,221	2,410	95,936	96,615	0,176	96,793
	Δ	35,0	0,04	15,0	110	0,087	0,028	0,518	0,087	0,006	0,030	0,034



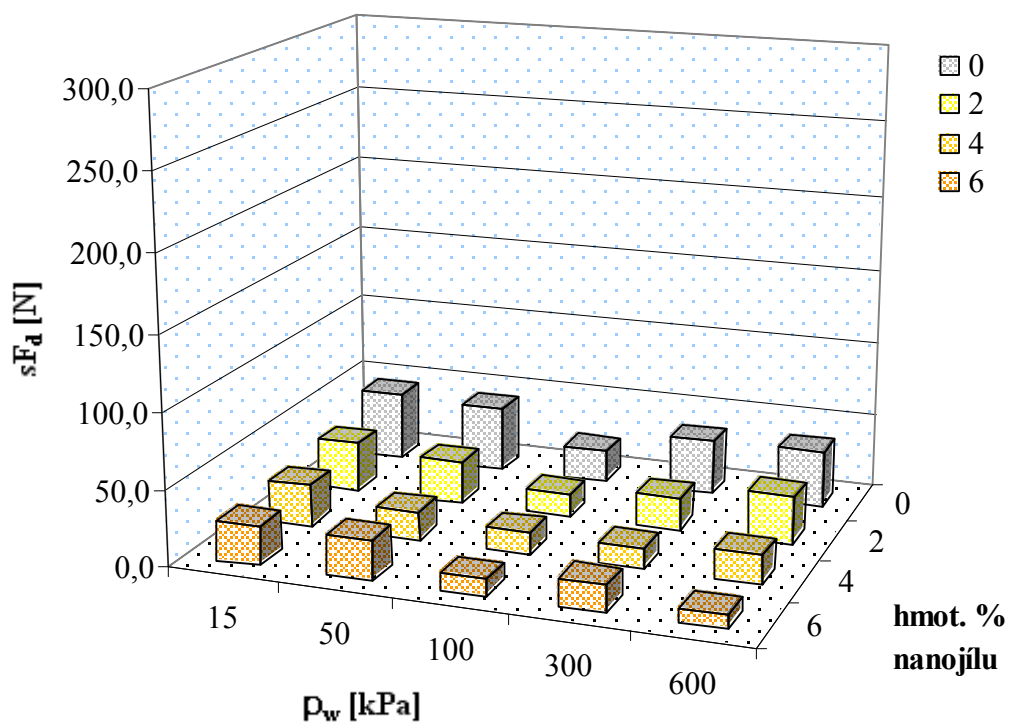
Obr. 4.44: Graf závislosti \bar{v}_w na hmotnostním procentu nanojilu a svařovacím tlaku p_w



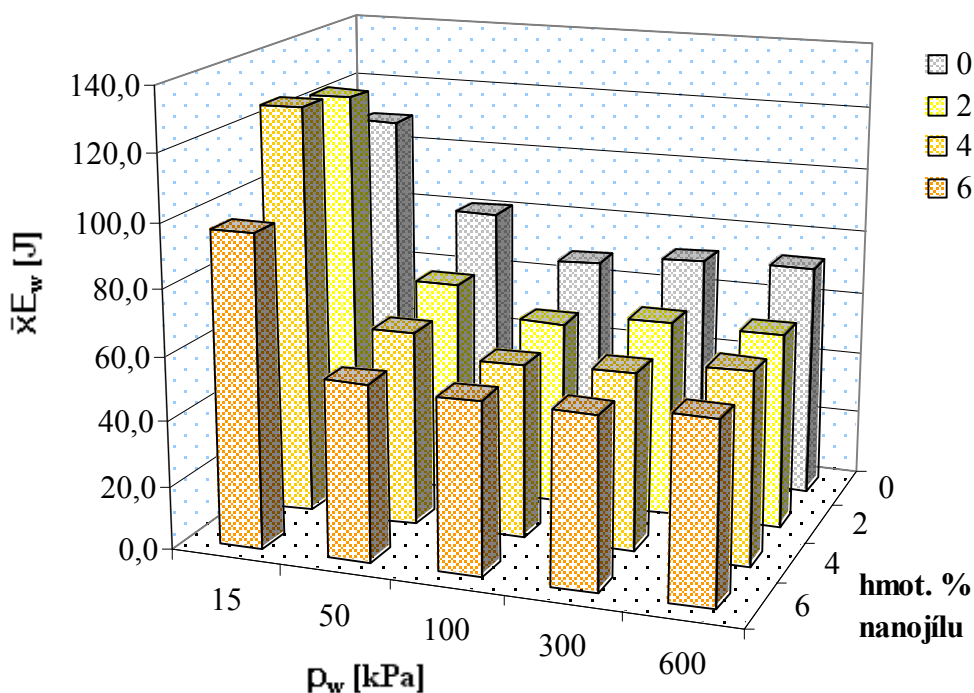
Obr. 4.45: Graf závislosti sv_w na hmotnostním procentu nanojilu a svařovacím tlaku p_w



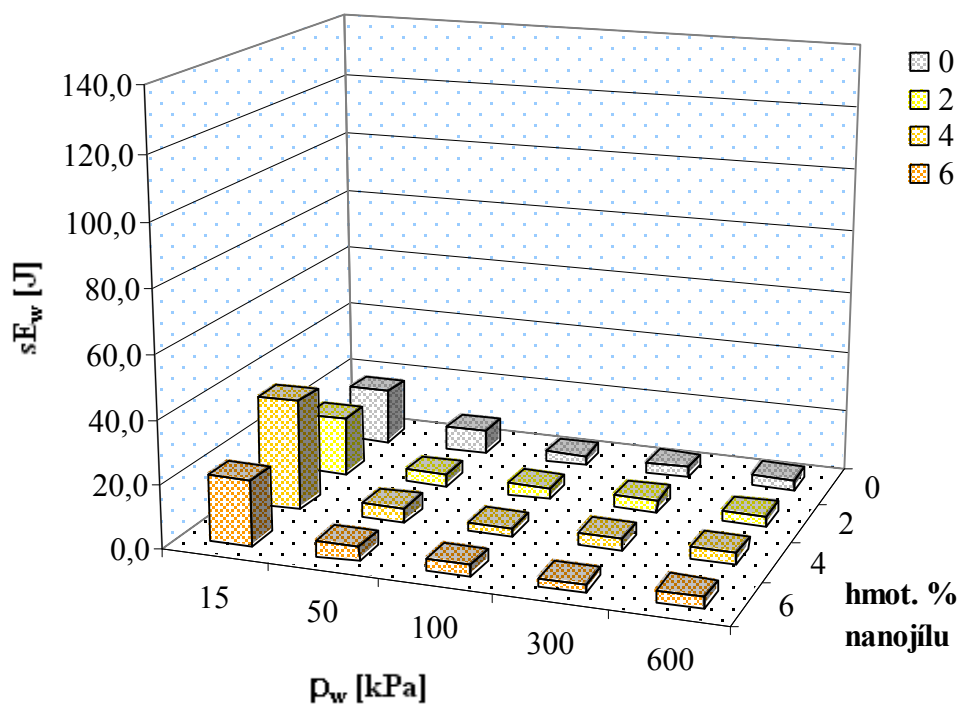
Obr. 4.46: Graf závislosti $\bar{x}F_d$ na hmotnostním procentu nanojálu a svařovacím tlaku p_w



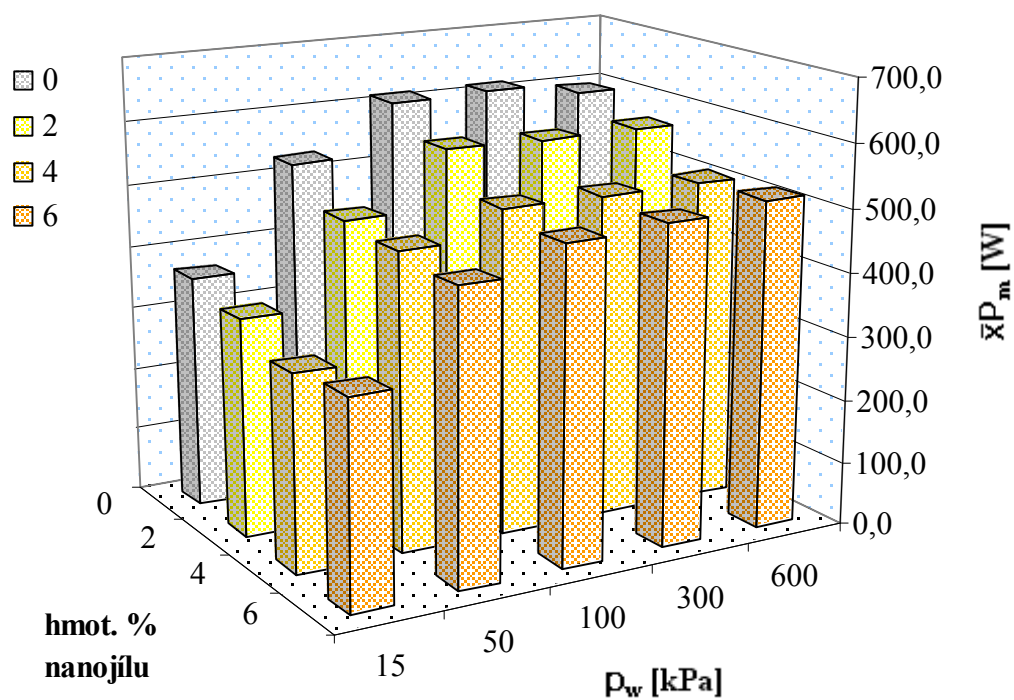
Obr. 4.47: Graf závislosti sF_d na hmotnostním procentu nanojálu a svařovacím tlaku p_w



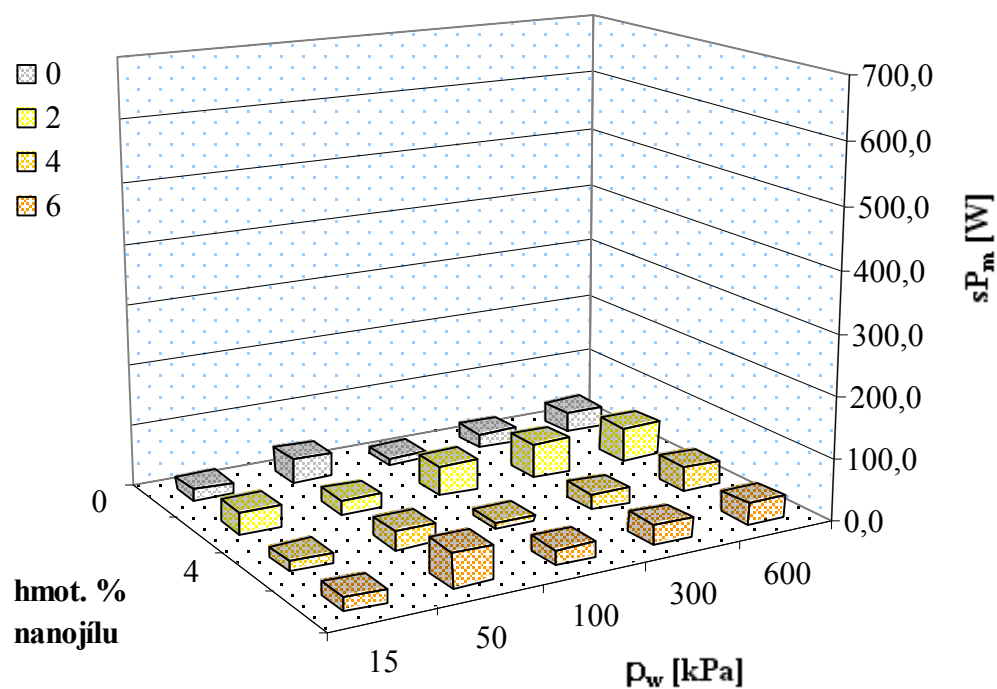
Obr. 4.48: Graf závislosti \bar{E}_w na hmotnostním procentu nanojílu a svařovacím tlaku p_w



Obr. 4.49: Graf závislosti sE_w na hmotnostním procentu nanojílu a svařovacím tlaku p_w



Obr. 4.50: Graf závislosti $\bar{x}P_m$ na hmotnostním procentu nanojílu a svařovacím tlaku p_w



Obr. 4.51: Graf závislosti sP_m na hmotnostním procentu nanojílu a svařovacím tlaku p_w

4.16.2 Vyhodnocení

Průměrná svařovací rychlost v_w

Střední hodnota průměrné svařovací rychlosti $\bar{x}v_w$ nevykazuje závislost na koncentraci nanojílů a se zvyšujícím se svařovacím tlakem vzrůstá až do tlaku 100 kPa (obr. 4.44). Další zvyšování tlaku již nezpůsobuje nárůst rychlosti. Vzhledem ke kolísání středních hodnot rychlosti mezi sériemi s různou koncentrací nanojílů byl vypočítán aritmetický průměr $\bar{X}v_w$ z rychlostí $\bar{x}v_w$ ze všech sérií při daném svařovacím tlaku. Zvýšení svařovacího tlaku z hodnoty 15 kPa na hodnotu 600 kPa zvýšilo rychlost $\bar{X}v_w$ z 1,290 mm/s na hodnotu 2,553 mm/s. Otázkou bylo zda konstantní průběh svařovací rychlosti pro vyšší svařovací tlaky je způsobený charakteristikou hydraulického brzdíče nebo má na tento průběh svařovací rychlosti vliv i rychlost tavení svařovaného materiálu. Pro zjištění příčiny ustálení svařovací rychlosti od tlaku 100 kPa se porovnála síla naměřená na sonotrodě F_s od pneuválce s vypočítanou teoretickou silou. Teoreticky vypočítaná síla F_{pv} je pro 15 kPa 47,5 N, pro 50 kPa 158,4 N a pro 600 kPa 1900,1 N. Maximální okamžitá síla F_s odečtená z grafů pro sérii 0 % je pro 15 kPa přibližně na 50 N, pro 50 kPa na 95 N a pro 600 kPa na 110 N. Měřená síla na sonotrodě F_s při svařovacím tlaku 15 kPa dosáhla hodnoty teoretické síly F_{pv} , kterou byl pneumatický válec schopen působit na sonotrodu. během svařování. Při svařovacím tlaku 50 až 600 kPa byla na straně sonotrody silová rezerva. Lze tedy říci, že relativně konstantní průběh svařovací rychlosti mezi svařovacími tlaky 100 až 600 kPa je dán pouze charakteristikou hydraulického brzdíče. Takže vliv změny tlaku na destrukční sílu, energii svařování a okamžitý maximální výkon je svázán s charakteristikou hydraulického brzdíče.

Destrukční síla F_d

Střední hodnota destrukční síly $\bar{X}F_d$ s rostoucí svařovací rychlostí klesá a s rostoucím procentem nanojílů dochází k poklesu střední hodnoty destrukční síly $\bar{X}F_d$ (obr. 4.46). Pro neplněný polypropylen a nízký svařovací tlak $p_w = 15$ kPa byla zjištěna střední hodnota destrukční síly 271,4 N a pro plněný polypropylen s 6% nanojílů a vysokým svařovacím tlakem $p_w = 600$ kPa byla zjištěna střední hodnota destrukční síly 77 N. Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly $\bar{X}F_d$ pro $p_w = 15$ kPa a $p_w = 600$ kPa se pro jednotlivé koncentrace 0% až 6% pohybuje od 1,23 do

1,59. Poměr mezi hodnotou $\bar{X}F_d$ pro 0% a 6% plniva pro jednotlivé nastavované svařovací tlaky je v rozsahu od 2,22 do 2,57.

Statistická analýza dat destrukční síly pro konstantní koncentrace (řádky v tab. 4.28) a svařovací tlaky (sloupce v tab. 4.28) vykazala závislost destrukční síly na koncentraci nanojílů i svařovacím tlaku, resp. svařovací rychlosti (viz. tab. 4.28). Mnohonásobným porovnáváním byla zjištěna shoda destrukční síly pro svařovací tlaky 100, 300 a 600 kPa (viz. tab. 29) pro všechny koncentrace plniva. Dále existuje shodnost destrukční síly mezi sériemi s 2 % a 4% nanojílů pro všechny jednotlivé svařovací tlaky (viz. tab. 30).

Tab. 4.28: p-hodnoty metod statistické analýzy pro F_d

hmot. % nanojílu	p-hodnota [1]						
	A-D					BT/LN	AN/K-W
	p _w [kPa]						
	15	50	100	300	600		
0	0,105	0,646	0,263	0,101	0,255	0,024/0,058	0/-
2	0,220	0,328	0,536	0,258	0,007	-/0,044	-/0
4	0,083	0,796	0,227	0,086	0,117	0,010/0,070	0/-
6	0,186	0,122	0,726	0,107	0,951	0/0	-/0
BT/LN 0-6%	0,051/ 0,076	0,003/ 0,017	0,029/ 0,204	0/ 0,002	- /0	-	-
AN/ K-W 0-6%	0/-	-/0	0/-	- /0	-/0	-	-

Tab. 4.29: Výsledky mnohonásobného porovnávání statistickými metodami pro data v tab. 4.28 - konstantní koncentrace plniva a proměnlivý svařovací tlak pro F_d

	hmot. % nanojílů															
	0				2				4				6			
p _w [kPa]	15	50	100	300	15	50	100	300	15	50	100	300	15	50	100	300
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50		-	-	-	•	-	-	-		-	-	-		-	-	-
100			-	-			-	-		•	-	-		•	-	-
300			•	-		•	•	-		•	•	-		•	•	-
600			•	•		•	•	•		•	•	•		•	•	•

“•” značka shodnosti skupin ; “_” značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami; uvedena pouze ½ porovnávacího pole pro danou hodnotu faktoru

Tab. 4.30 Výsledky mnohonásobného porovnávání statistickými metodami pro data v tab. 4.28 - konstantní svařovací tlak a proměnlivá koncentrace plniva pro F_d

	p_w [kPa]														
	15			50			100			300			600		
hmot. % nanojílů	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2		-	-		-	-		-	-		-	-		-	-
4		•	-		•	-		•	-		•	-		•	-
6						•						•			

“•” značka shodnosti skupin ; “_” značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami; uvedena pouze 1/2 porovnávacího pole pro danou hodnotu faktoru

Energie svařování E_w

Střední hodnota energie svařování $\bar{X}E_w$ dodaná tělískům s rostoucí svařovací rychlostí klesá. S rostoucí koncentrací nanojílů dochází k velice pozvolnému poklesu střední hodnoty energie svařování kromě energie při nejnižším svařovacím tlaku 15 kPa, kde tento trend nebyl zaznamenán (obr. 4.48). Pravděpodobně kvůli zvýšenému rozptylu naměřených hodnot (obr. 4.49). Střední hodnota energie svařování klesá od hodnoty 109,3 J pro neplněný polypropylen ($\bar{X}v_w = 1,290$ mm/s) až k hodnotě 55,9 J pro 6% nanojílů ($\bar{X}v_w = 2,553$ mm/s). Poměr mezi střední hodnotou energie svařování $\bar{X}E_w$ pro $p_w = 15$ kPa a $p_w = 600$ kPa pro jednotlivé koncentrace 0% až 6% se pohybuje od 1,50 do 2,14. Poměr mezi hodnotou $\bar{X}E_w$ pro 0% a 6% plniva pro jednotlivé nastavované svařovací tlaky $p_w = 15$ kPa až $p_w = 600$ kPa je v rozsahu od 1,13 do 1,49.

Maximální okamžitý výkon P_m

Střední hodnota maximálního okamžitého výkonu na sonotrodě $\bar{X}P_m$ vykazuje slabý pokles v závislosti na rostoucí koncentraci nanojílů, který je porušen pro svařovací tlak 15 a 600 kPa (obr. 4.50). Střední hodnota výkonu roste s rostoucí svařovací rychlostí. Pro neplněný polypropylen a vysoký svařovací tlak $p_w = 600$ kPa byla vypočítána střední hodnota výkonu 596,5 W a pro plněný polypropylen s 6 % nanojílů a nízký svařovací tlak $p_w = 15$ kPa se zjistil výkon 320,5 W. Poměr mezi střední hodnotou výkonu $\bar{X}P_m$ pro $p_w = 600$ kPa a $p_w = 15$ kPa se pro jednotlivé

koncentrace 0% až 6% pohybuje od 1,61 do 1,65. Poměr mezi hodnotou $\bar{X}P_m$ pro 0% a 6% plniva pro jednotlivé nastavované svařovací tlaky je v rozsahu od 1,15 do 1,24.

Pro $p_w = 50 - 600$ kPa:

Největší zjištěná odchylka d_{wf} od d_{wft} je $+ 10 \mu m$. Δd_u se pohybuje mezi 36 až 155 μm . $\bar{X}d_h$ je v rozsahu 169 až 205 μm .

4.16.3 Dílčí závěr

Zvyšování svařovacího tlaku při konstantním stupni brzdění způsobuje nárůst svařovací rychlosti, ale pro dané svařovací zařízení se tak děje jen do určité hodnoty tlaku. Je to dáno charakteristikou hydraulického brzdíče, kdy po dosažení určitého svařovacího tlaku již nedochází k nárůstu svařovací rychlosti a je tedy ztracena závislost svařovací rychlosti na svařovacím tlaku. Zvyšování svařovací rychlosti snižuje hodnotu energie svařování a tedy dochází i ke snižování hodnoty destrukční síly. Zvyšováním svařovací rychlosti prostřednictvím zvyšování svařovacího tlaku dochází k nárůstu okamžitého svařovacího výkonu sonotrody.

Nárůst procenta nanojílu způsobuje pokles destrukční síly a slabý pokles energie svařování a maximálního okamžitého výkonu. Při svařování na konstantní výšku svařence je pokles destrukční síly mezi neplněnou sérií a plněnými sériemi značný, kde velkou část změny způsobuje zmenšení tloušťky zkušebních tělísek vlivem plniva při vstřikování za neměnných podmínek vstřikování.

Statistická analýza zjistila závislost destrukční síly na koncentraci nanojílu a svařovacím tlaku, resp. svařovací rychlosti. Byla nalezena shodnost destrukční síly pro svařovací tlaky 100, 300 a 600 kPa pro všechny koncentrace nanojílu. Destrukční síla se také shoduje pro série 2% a 4% nanojílu pro všechny jednotlivé svařovací tlaky.

4.17 Měření vlivu změny svařovací amplitudy

Obecně doporučovaný rozsah svařovací amplitudy pro polypropylen je 70 až 125 μm . Maximální amplituda na pracovní ploše užitá sonotrody byla 100 μm a tato hodnota byla volena jako základní hodnota pro svařování. Měření zjišťující vliv

svařovací amplitudy při svařování polypropylenu s různou koncentrací nanojílů bylo provedeno při svařovací amplitudě $A_w = 70 \mu\text{m}$ za následujících svařovacích podmínek:

- 1) $K = 3$ [1]; $p_w = 50 \text{ kPa}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$
- 2) $K = 6$ [1]; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$
- 3) $K = 9$ [1]; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$

Podmínky svařování byly voleny pro rozdílné energie svařování. Volba amplitudy $70 \mu\text{m}$ byla učiněna na základě obecně doporučovaného rozsahu pro polypropylen a na základě výsledků měření. První měření uskutečněné pro $K = 3$ [1] a $p_w = 50 \text{ kPa}$ při amplitudě $85 \mu\text{m}$ vykazovalo jen malou změnu pevnosti svaru a proto bylo voleno svařování při větší změně amplitudy, tedy při $70 \mu\text{m}$.

4.17.1 Zpracovaná naměřená data

Naměřená data pro $A_w = 70 \mu\text{m}$ jsou uvedena v příloze 8. Data pro podmínky svařování při $A_w = 100 \mu\text{m}$ a $K = 3$ [1] - $p_w = 50 \text{ kPa}$; $K = 6$ [1] - $p_w = 15 \text{ kPa}$; $K = 9$ [1] - $p_w = 15 \text{ kPa}$ použita v grafech obr. 4.52 až obr. 4.59 a statistické analýze byla převzata z kapitol 4.15, 4.16 a příloh 6, 7.

Tab. 4.31: $K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm

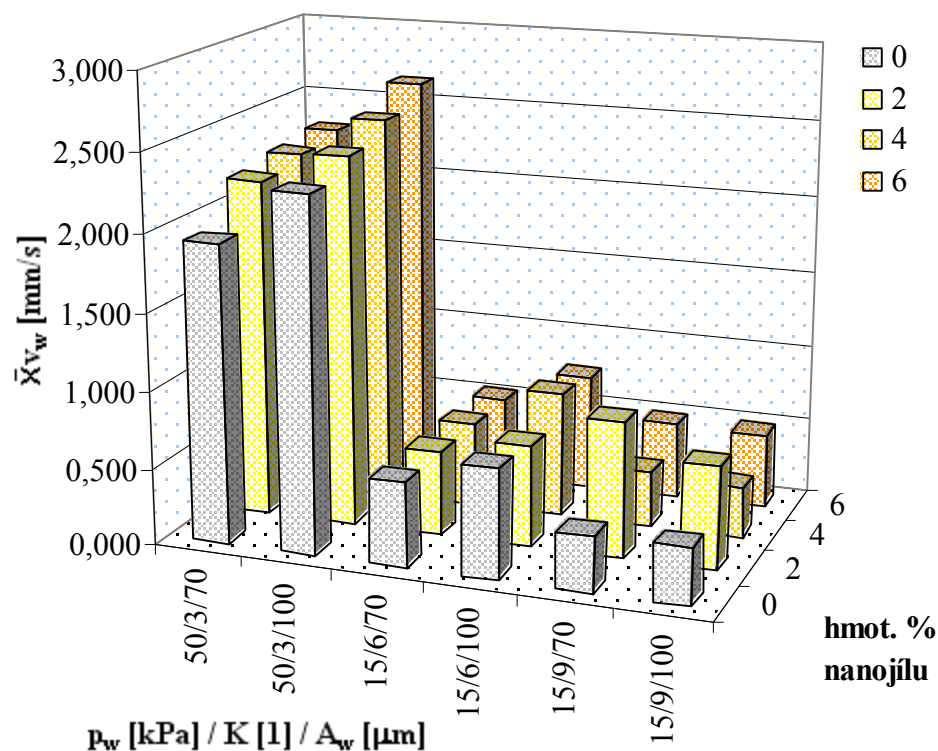
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	212,1	8,13	69,7	376	0,631	0,328	1,937	95,985	96,616	0,146	96,763
	s	37,4	0,03	6,2	24	0,020	0,030	0,128	0,020	0,001	0,008	0,009
	x_{max}	260,4	8,20	83,0	423	0,659	0,386	2,201	96,044	96,619	0,157	96,774
	x_{min}	93,0	8,08	58,0	319	0,573	0,275	1,661	95,958	96,615	0,119	96,734
	Δ	167,4	0,12	25,0	104	0,086	0,111	0,540	0,086	0,004	0,038	0,040
2	\bar{x}	117,4	8,14	50,7	318	0,613	0,280	2,196	96,004	96,616	0,159	96,775
	s	21,7	0,02	5,0	23	0,016	0,019	0,140	0,016	0,001	0,008	0,008
	x_{max}	174,4	8,17	60,9	368	0,650	0,312	2,423	96,031	96,619	0,174	96,791
	x_{min}	96,0	8,10	43,2	289	0,586	0,246	1,935	95,967	96,615	0,143	96,758
	Δ	78,4	0,07	17,7	79	0,064	0,066	0,489	0,064	0,004	0,031	0,033
4	\bar{x}	95,7	8,14	48,0	323	0,597	0,266	2,254	96,019	96,616	0,166	96,782
	s	11,5	0,02	3,0	23	0,015	0,019	0,120	0,016	0,001	0,008	0,009
	x_{max}	118,0	8,18	56,1	365	0,618	0,292	2,491	96,047	96,618	0,188	96,805
	x_{min}	79,0	8,11	44,8	293	0,569	0,234	2,074	95,998	96,615	0,153	96,769
	Δ	39,0	0,07	11,3	72	0,049	0,058	0,418	0,049	0,003	0,035	0,036
6	\bar{x}	83,0	8,13	47,2	330	0,596	0,261	2,298	96,021	96,616	0,165	96,781
	s	13,6	0,02	3,0	29	0,015	0,026	0,198	0,015	0,001	0,010	0,010
	x_{max}	114,4	8,17	52,1	381	0,621	0,298	2,655	96,052	96,621	0,183	96,800
	x_{min}	59,0	8,11	36,4	297	0,566	0,222	1,993	95,994	96,615	0,152	96,768
	Δ	55,4	0,06	15,7	84	0,055	0,076	0,661	0,058	0,006	0,031	0,032

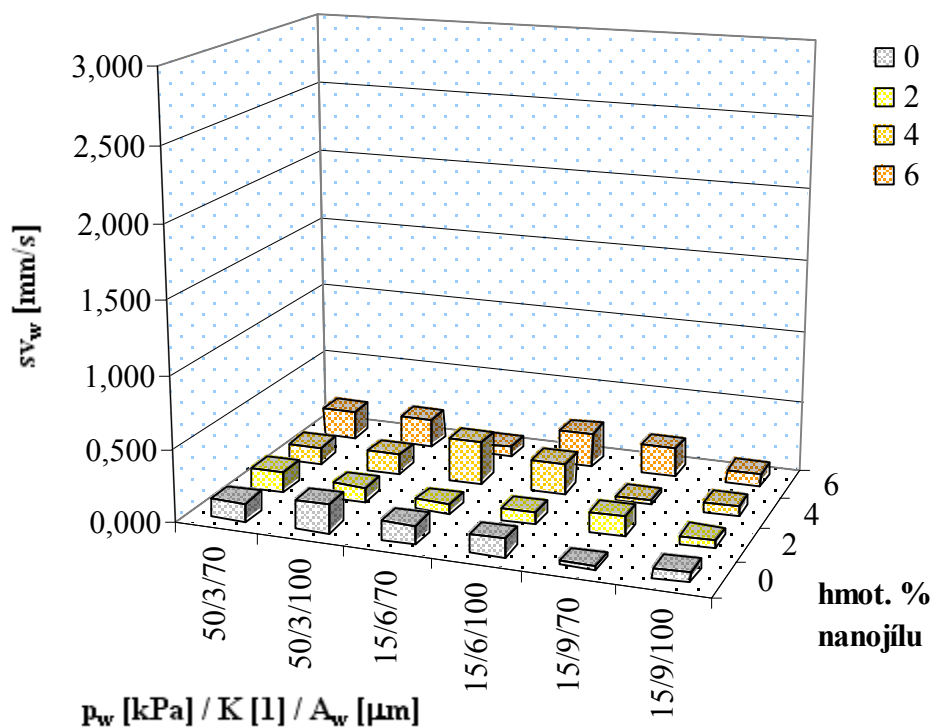
Tab. 4.32: $K = 6$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm

hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
0	\bar{x}	260,7	8,08	165,3	203	0,638	1,215	0,553	95,977	96,615	0,187	96,802
	s	69,9	0,03	37,1	19	0,027	0,275	0,132	0,028	0,001	0,024	0,023
	x_{max}	384,4	8,14	214,6	230	0,673	1,591	0,814	96,030	96,617	0,218	96,833
	x_{min}	144,3	8,03	106,2	168	0,585	0,768	0,423	95,942	96,615	0,148	96,764
	Δ	240,1	0,11	108,4	62	0,088	0,823	0,391	0,088	0,002	0,070	0,069
2	\bar{x}	81,6	8,09	166,3	194	0,594	1,098	0,548	96,021	96,615	0,191	96,806
	s	55,4	0,01	25,2	15	0,015	0,129	0,068	0,015	0,000	0,012	0,012
	x_{max}	167,4	8,11	204,7	228	0,626	1,323	0,733	96,040	96,615	0,213	96,828
	x_{min}	0,0	8,07	100,6	172	0,575	0,795	0,450	95,989	96,615	0,176	96,791
	Δ	167,4	0,04	104,1	56	0,051	0,528	0,283	0,051	0,000	0,037	0,037
4	\bar{x}	95,4	8,09	176,1	185	0,591	1,360	0,552	96,024	96,615	0,197	96,812
	s	70,7	0,03	76,1	26	0,027	0,590	0,295	0,027	0,000	0,023	0,023
	x_{max}	196,0	8,12	275,3	244	0,663	2,270	1,067	96,062	96,616	0,249	96,864
	x_{min}	0,0	8,02	69,5	162	0,553	0,524	0,278	95,952	96,615	0,163	96,778
	Δ	196,0	0,10	205,8	82	0,110	1,746	0,789	0,110	0,001	0,086	0,086
6	\bar{x}	77,3	8,11	145,2	186	0,587	1,111	0,536	96,028	96,615	0,179	96,794
	s	62,0	0,02	29,8	12	0,015	0,148	0,067	0,015	0,000	0,008	0,008
	x_{max}	181,0	8,13	191,7	226	0,640	1,380	0,646	96,042	96,616	0,192	96,807
	x_{min}	0,0	8,07	102,7	173	0,573	0,919	0,427	95,975	96,615	0,159	96,774
	Δ	181,0	0,06	89,1	53	0,067	0,461	0,219	0,067	0,001	0,033	0,033

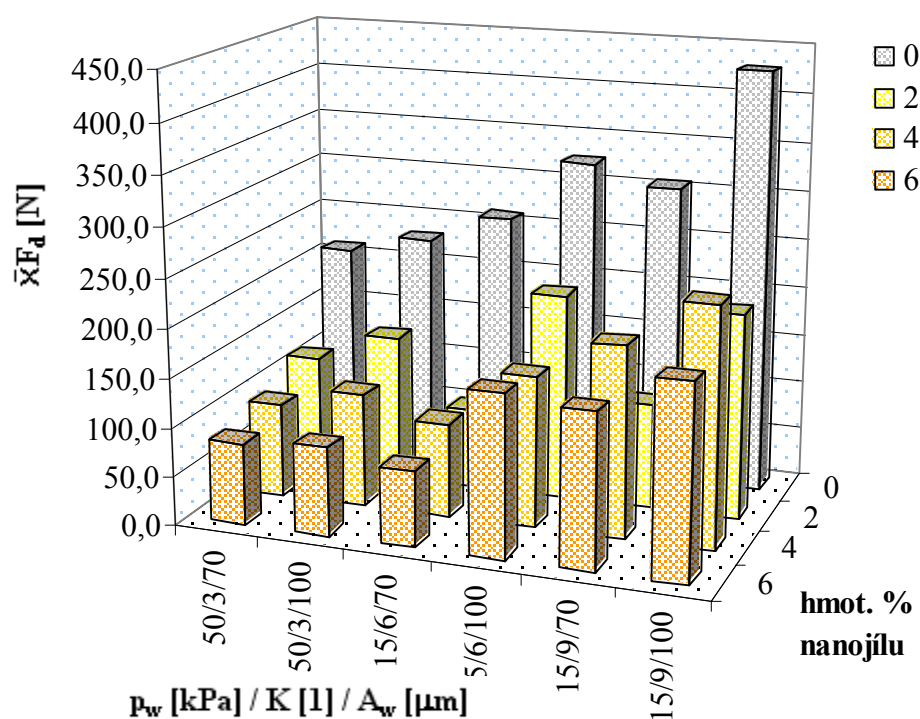
Tab. 4.33: $K = 9$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{1f} [mm]
0	\bar{x}	307,0	8,10	200,3	208	0,591	1,642	0,362	96,024	96,615	0,166	96,782
	s	36,1	0,01	16,4	18	0,009	0,136	0,026	0,009	0,000	0,012	0,012
	x_{max}	351,2	8,12	234,1	241	0,606	2,007	0,417	96,042	96,616	0,195	96,810
	x_{min}	206,0	8,07	176,9	181	0,574	1,417	0,300	96,009	96,615	0,154	96,769
	Δ	145,2	0,05	57,2	60	0,032	0,590	0,117	0,033	0,001	0,041	0,041
2	\bar{x}	107,4	8,07	216,7	187	0,570	1,549	0,883	96,045	96,615	0,205	96,820
	s	78,5	0,02	37,6	8	0,008	0,226	0,131	0,008	0,000	0,012	0,012
	x_{max}	250,4	8,09	261,7	206	0,583	1,877	1,070	96,067	96,615	0,228	96,843
	x_{min}	0,0	8,03	131,4	175	0,548	1,041	0,591	96,032	96,615	0,182	96,797
	Δ	250,4	0,06	130,3	31	0,035	0,836	0,479	0,035	0,000	0,046	0,046
4	\bar{x}	193,7	8,06	193,4	183	0,581	1,610	0,364	96,034	96,615	0,204	96,819
	s	52,3	0,02	25,5	7	0,012	0,168	0,032	0,012	0,000	0,012	0,012
	x_{max}	260,4	8,09	269,9	201	0,599	2,134	0,426	96,069	96,617	0,218	96,833
	x_{min}	66,7	8,02	139,8	172	0,546	1,283	0,277	96,016	96,615	0,168	96,783
	Δ	193,7	0,07	130,1	29	0,053	0,851	0,149	0,053	0,002	0,050	0,050
6	\bar{x}	156,5	8,07	159,0	200	0,575	1,385	0,500	96,040	96,615	0,188	96,803
	s	50,4	0,02	65,3	20	0,016	0,643	0,201	0,017	0,000	0,011	0,011
	x_{max}	236,8	8,11	276,9	231	0,612	2,451	0,779	96,065	96,616	0,215	96,830
	x_{min}	79,7	8,04	85,4	173	0,550	0,719	0,240	96,003	96,615	0,171	96,786
	Δ	157,1	0,07	191,5	58	0,062	1,732	0,539	0,062	0,001	0,044	0,044

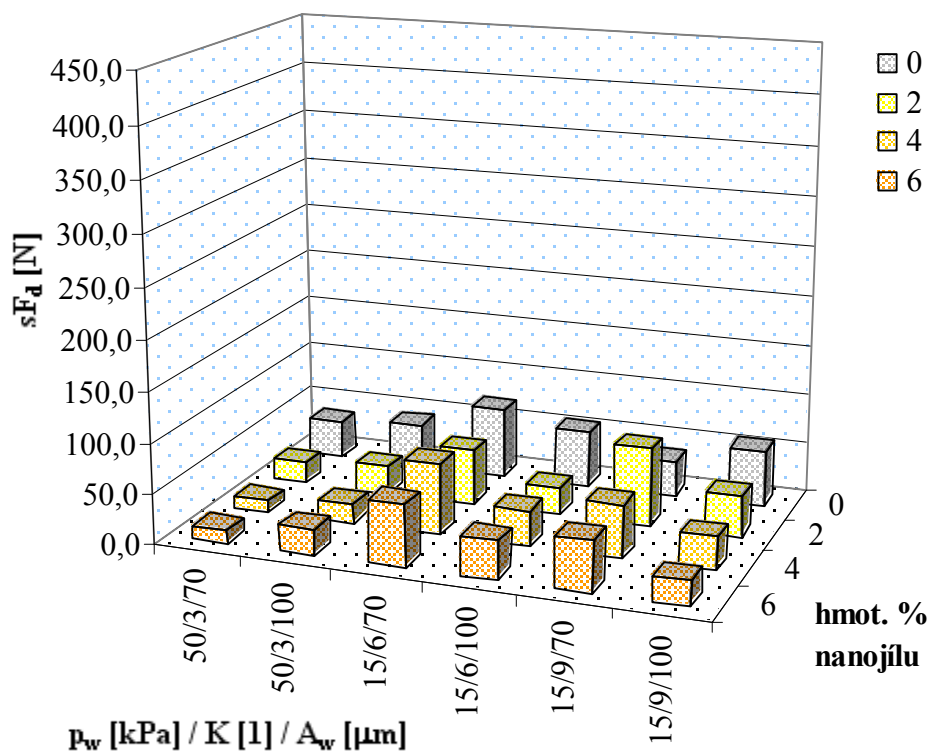

Obr. 4.52: Graf závislosti \bar{x}_{v_w} na hmotnostním procentu nanojílu a podmínkách svařování 1-3



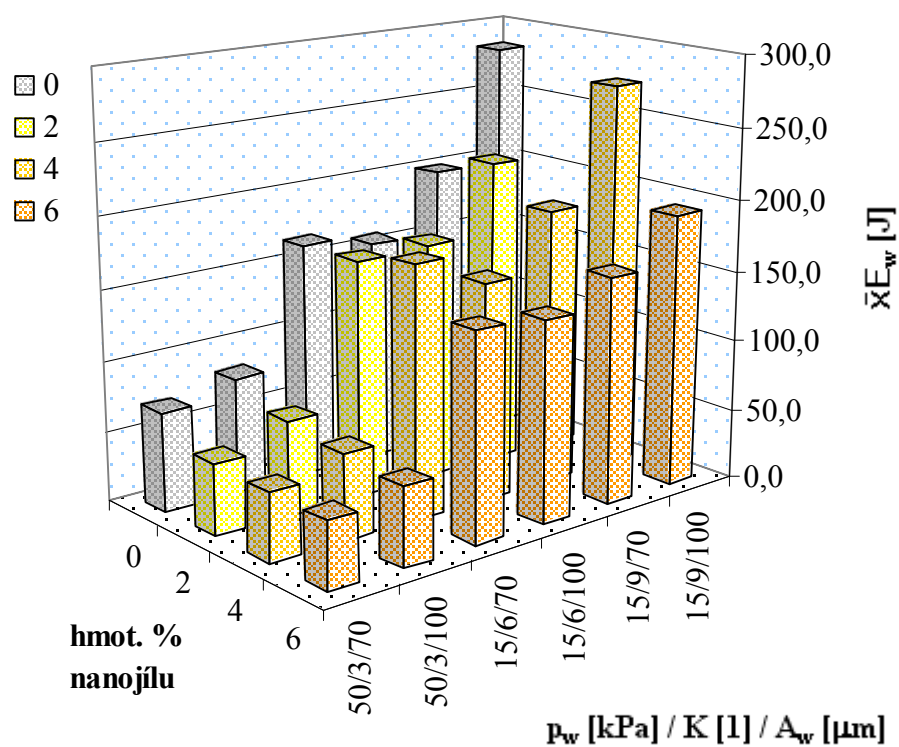
Obr. 4.53: Graf závislosti sv_w na hmotnostním procentu nanojílu a podmínkách svařování 1-3



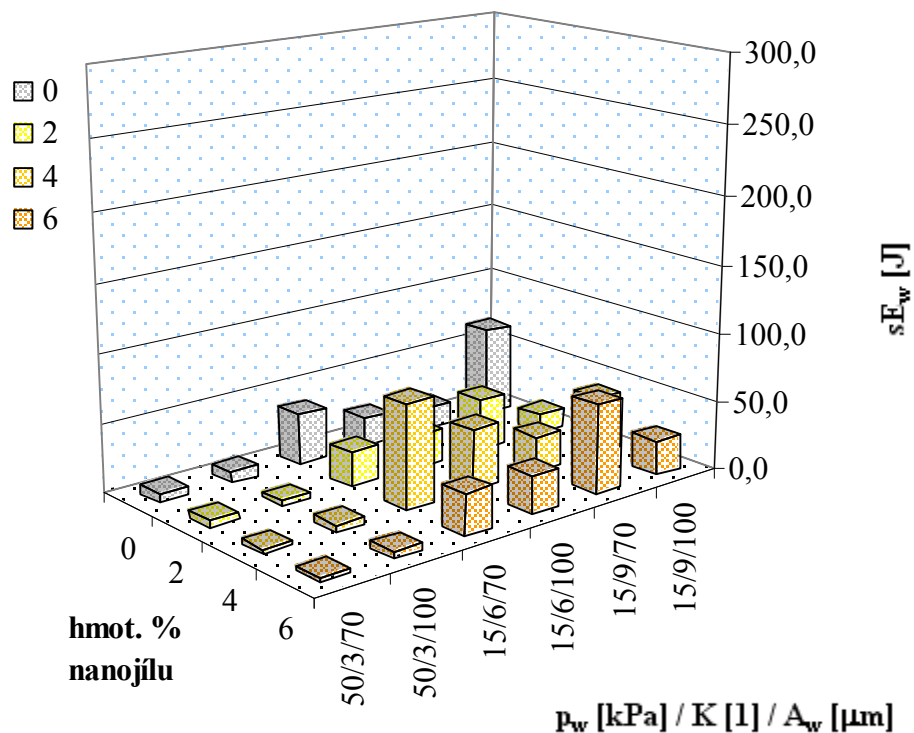
Obr. 4.54: Graf závislosti \bar{F}_d na hmotnostním procentu nanojílu a podmínkách svařování 1-3



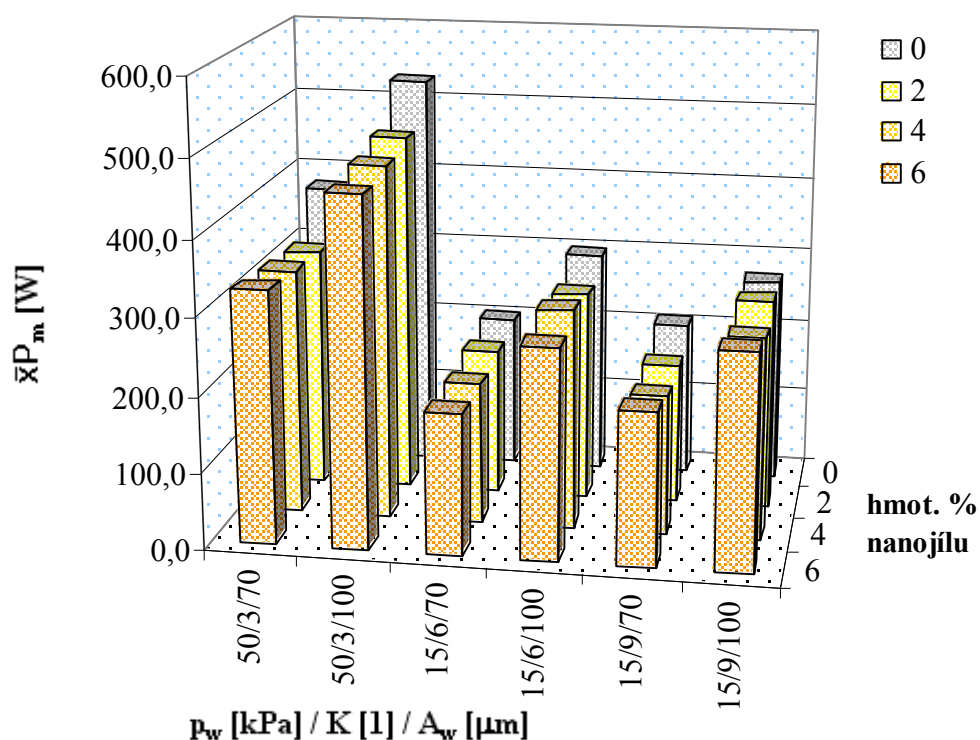
Obr. 4.55: Graf závislosti sF_d na hmotnostním procentu nanojílů a podmínkách svařování 1-3



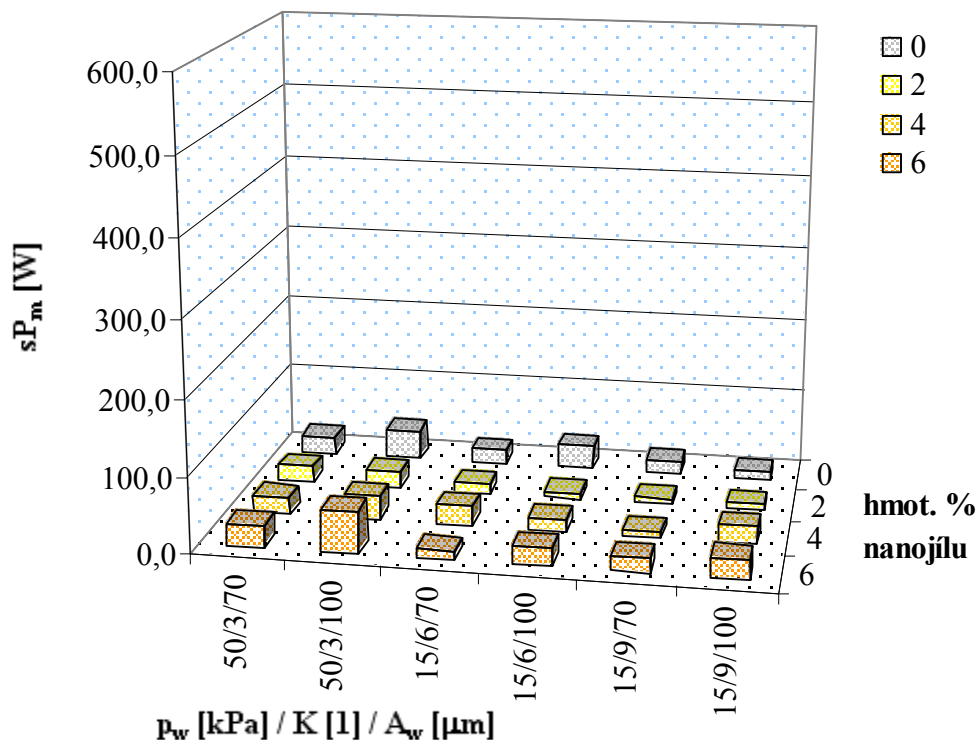
Obr. 4.56: Graf závislosti $\bar{x}E_w$ na hmotnostním procentu nanojílů a podmínkách svařování 1-3



Obr. 4.57: Graf závislosti sE_w na hmotnostním procentu nanojílu a podmínkách svařování 1-3



Obr. 4.58: Graf závislosti $\bar{x}P_m$ na hmotnostním procentu nanojílu a podmínkách svařování 1-3



Obr. 4.59: Graf závislosti $\bar{x}P_m$ na hmotnostním procentu nanojilu a podmínkách svařování 1-3

4.17.2 Vyhodnocení

Průměrná svařovací rychlost v_w

Pro nižší hodnotu energie svařování střední hodnota průměrné svařovací rychlosti pozvolna roste s nárůstem koncentrace nanojilu a je nižší pro nižší amplitudu svařování. Největší rozdíl činí pro jednotlivé koncentrace 0,352 mm/s. Pro vyšší hladiny energie a tudíž i nižší rychlosti svařování trend závislosti rychlosti na koncentraci nanojilu mizí a objevuje se rozkolísanost svařovací rychlosti. V tab. 4.34 je uveden aritmetický průměr středních průměrných rychlostí svařování ze sérií s koncentracemi 0 až 6% nanojilu pro podmínky svařování 1-3.

Tab. 4.34: Aritmetický průměr středních průměrných rychlostí svařování ze sérií s koncentracemi 0 až 6% nanojílů

	Podmínky svařování					
	1		2		3	
A_w [μm]	70	100	70	100	70	100
\bar{X}_{v_w} [mm/s]	2,171	2,462	0,547	0,737	0,527	0,467

Destrukční síla

Podmínky svařování 1

Střední hodnota destrukční síly při snížení svařovací amplitudy klesla. Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly pro amplitudu 100 μm až 70 μm pro jednotlivé koncentrace nanojílů se pohybuje v rozsahu od 1,08 do 1,27. Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly pro sérii 0% a 6% je pro amplitudu 70 μm 2,56 a pro amplitudu 100 μm 2,57. Statistická analýza prokázala shodnost destrukční síly mezi rozdílnými amplitudami pro sérii 0% a 6%. (viz. tab. 35). Pro jednotlivé amplitudy byla nalezena shodnost sérií 2 - 4 % a 4 – 6 %. (viz. tab. 38).

Tab. 4.35: p-hodnoty metod statistické analýzy pro F_d – podmínky svařování 1

hmot. % nanojílu	p-hodnota [1]			
	A-D		F-test/LN	AN/K-W
	A _w [μm]			
	70	100		
0	0,020	0,646	-/0,462	-/0,242
2	0	0,328	-/0,060	-/0
4	0,379	0,796	0,028/0,065	0/-
6	0,280	0,122	0,006/0,055	0,055/-
BT/LN 0-6 %	- / 0,010	0,003/ 0,017	-	-
AN/ K-W 0-6 %	-/0	-/0	-	-

Podmínky svařování 2

Střední hodnota destrukční síly se snížením svařovací amplitudy klesla. Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly pro amplitudu 100 μm a 70 μm se pro jednotlivé koncentrace nanojílů pohybuje v rozsahu od 1,25 do 2,57. Poměr mezi

střední hodnotou destrukční síly pro sérii 0% a 6% je pro amplitudu 70 μm 3,37 a pro amplitudu 100 μm 1,98. Statistická analýza neprokázala shodnost destrukční síly mezi rozdílnými amplitudami pro jednotlivé koncentrace (viz tab. 36), ale prokázala shodnost série 4 % a 6% pro jednotlivé amplitudy (viz. tab. 38).

Tab. 4.36: p-hodnoty metod statistické analýzy pro F_d – podmínky svařování 2

hmot. % nanojílu	p-hodnota [1]			
	A-D		F-test/LN	AN/K-W
	A _w [μm]			
	70	100		
0	0,868	0,382	0,324/0,198	0,002/-
2	0,035	0	-/0,022	-/0
4	0,006	0,457	-/0	-/0,010
6	0	0,119	-/0,122	-/0
BT/LN 0-6%	- / 0,363	- / 0,041	-	-
AN/ K-W 0-6%	-/0	-/0	-	-

Podmínky svařování 3

Střední hodnota destrukční síly se snížením svařovací amplitudy klesla a silně kolísala pro jednotlivé koncentrace nanojílu. Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly pro amplitudu 100 μm a 70 μm pro jednotlivé koncentrace nanojílu se pohybuje v rozsahu od 1,25 do 1,94. Poměr mezi střední hodnotou destrukční síly pro sérii 0% a 6% je pro amplitudu 70 μm 1,96 a pro amplitudu 100 μm 2,21. Statistická analýza neprokázala shodnost destrukční síly mezi oběma amplitudami pro jednotlivé koncentrace (viz tab. 37), ale prokázala shodnost série 2 % a 6% pro jednotlivé amplitudy (viz. tab. 38).

Tab. 4.37: p-hodnoty metod statistické analýzy pro F_d – podmínky svařování 3

hmot. % nanojílu	p-hodnota [1]			
	A-D		F-test/LN	AN/K-W
	A _w [μm]			
	70	100		
0	0,157	0,548	0,050/0,064	0/-
2	0,128	0,861	0,005/0,025	-/0
4	0	0,320	- /0,396	-/0,001
6	0,296	0,017	- /0,004	-/0,014
BT/LN 0-6 %	-/ 0,029	0,002/ 0,005	-	-
AN /K- W 0-6 %	-/0	-/0	-	-

Tab. 4.38 Výsledky mnohonásobného porovnávání statistickými metodami pro data v tab. 4.35 až 4.36 - konstantní svařovací amplituda a proměnlivá koncentrace plniva pro F_d

	A_w [μm]																	
	Podmínky svařování 1						Podmínky svařování 2						Podmínky svařování 3					
	70			100			70			100			70			100		
<i>hmot. % nanojílu</i>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2		-	-	-	-	-		-	-	-	-	-		-	-	-	-	-
4		•	-		•	-		•	-			-			-		•	-
6			•			•		•	•			•		•	•		•	

“•” značka shodnosti skupin ; “_” značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami;
uvedena pouze ½ porovnávacího pole pro danou hodnotu faktoru

Energie svařování

Podmínky svařování 1

Střední hodnota energie svařování snížením svařovací amplitudy klesá a zvýšení koncentrace nanojílu vyvolalo mírný pokles střední hodnoty energie (obr. 4.56). Poměr mezi střední hodnotou energie svařování pro amplitudu 100 μm a 70 μm pro jednotlivé koncentrace nanojílu se pohybuje v rozsahu 1,16 až 1,31. Poměr mezi

střední hodnotou energie svařování pro sérii 0% a 6% je pro amplitudu 70 μm 1,48 a pro amplitudu 100 μm 1,49.

Podmínky svařování 2 a 3

Střední hodnota energie svařování kolísá vlivem zvýšení dodávané energie tělískům. nebyla tedy hodnocena.

Maximální okamžitý výkon

Střední hodnota maximálního okamžitého výkonu sonotrody klesá se snížením svařovací amplitudy. Pro neplněný materiál je střední hodnota výkonu vyšší.

Podmínky svařování 1

Poměr mezi střední hodnotou výkonu pro amplitudu 100 μm až 70 μm pro jednotlivé koncentrace plniva se pohybuje v rozsahu 1,41 až 1,50. Poměr mezi střední hodnotou výkonu pro sérii 0% a 6% je pro amplitudu 70 μm 1,14 a pro amplitudu 100 μm 1,16.

Podmínky svařování 2

Střední hodnota maximálního okamžitého výkonu slabě kolísá mezi sériemi s různou koncentrací nanojílů. Poměr mezi střední hodnotou výkonu pro amplitudu 100 μm až 70 μm pro jednotlivé koncentrace plniva se pohybuje v rozsahu 1,43 až 1,56. Poměr mezi střední hodnotou výkonu pro sérii 0% a 6% je pro amplitudu 70 μm 1,09 a pro amplitudu 100 μm 1,08.

Podmínky svařování 3

Střední hodnota maximálního okamžitého výkonu slabě kolísá mezi jednotlivými koncentracemi nanojílů. Poměr mezi střední hodnotou výkonu pro amplitudu 100 μm až 70 μm pro jednotlivé koncentrace plniva se pohybuje v rozsahu 1,31 až 1,48.

Pro $A_w = 70 \text{ kPa}$, $K = 3, 6, 9$ [1]:

Největší zjištěná odchylka d_{wf} od d_{wft} je + 6 μm . Δd_u se pohybuje mezi 33 až 110 μm . $\bar{x}d_h$ je v rozsahu 146 až 205 μm .

4.17.3 Dílčí závěr

Se snížením svařovací amplitudy dochází ke snížení energie dodané do svarových ploch, čímž dochází k poklesu pevnosti svaru. Pro nižší hodnoty E_w je zjevný pokles střední hodnoty destrukční síly s narůstající koncentrací plniva a tento trend se s rostoucí energií svařování E_w ztrácí a zůstává pouze výrazný rozdíl mezi neplněnou sérií a plněnými sériemi. Výkon se s poklesem amplitudy snižuje. Až na dva případy byla prokázána statisticky významná odlišnost destrukční síly mezi rozdílnými amplitudami pro jednotlivé koncentrace nanojílu.

4.18 Měření vlivu vyšší hodnoty K a p_w při shodné svařovací rychlosti

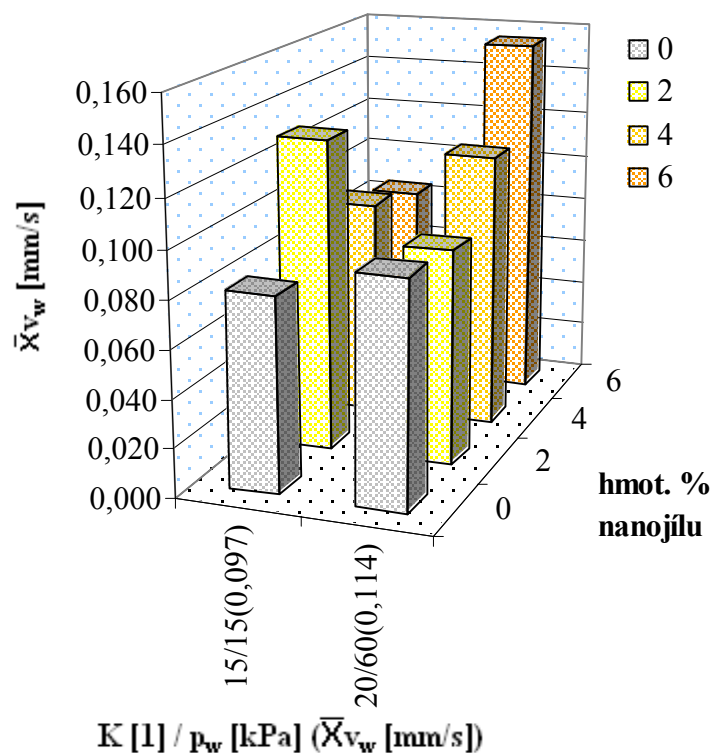
Při měření vlivu změny stupně brzdění a vlivu změny svařovacího tlaku byl vždy jeden řídicí parametr svařovací rychlosti konstantní a byl nastaven na nízkou hodnotu. Proto se provedlo měření při vyšších hodnotách obou řídicích parametrů svařovací rychlosti s následným porovnáním s daty vykazující shodnou svařovací rychlost při nižších hodnotách řídicích parametrů. Z měření vlivu změny brzdění se vybraly data pro $K = 15$ [1] při $p_w = 15$ kPa s aritmetickým průměrem středních průměrných rychlostí svařování $\bar{X}_{v_w} = 0,097$ mm/s ze všech koncentrací nanojílu. Byl vybrán stupeň brzdění $K = 20$ [1], který byl limitní pro $p_{ds} = 15$ kPa z hlediska rychlosti posuvu sonotrody. V předběžných testech byl stanoven svařovací tlak 60 kPa, který vykazoval $\bar{X}_{v_w} = 0,1$ mm/s.

4.18.1 Zpracované naměřené hodnoty

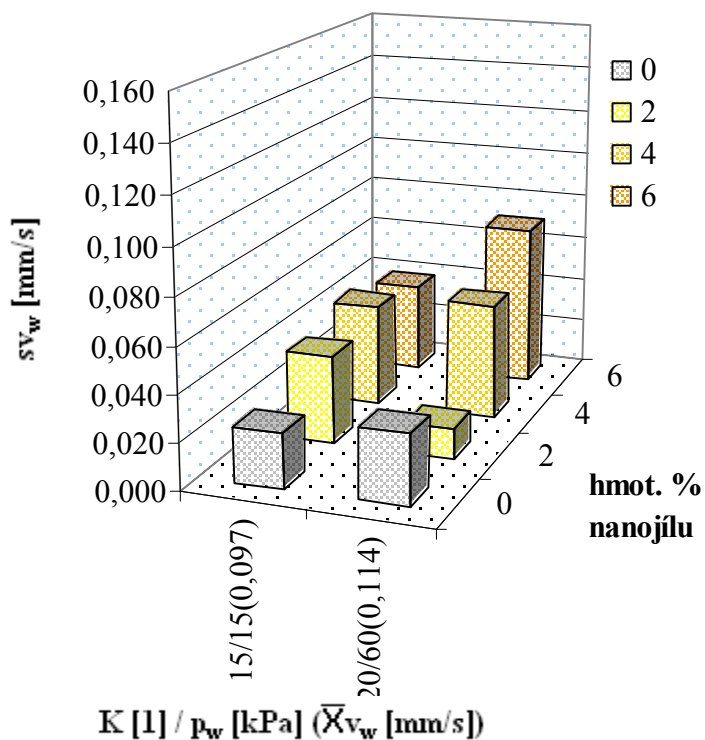
Naměřená data pro $K = 20$ [1]; $p_w = 60$ kPa jsou uvedena v příloze 9. Srovnávací data ($p_w = 15$ kPa; a $K = 15$ [1]) použita v grafech (obr. 4.60 až obr. 4.67) jsou převzata z kapitoly 4.15 a pro statistickou analýzu byla data čerpána z přílohy 6.

Tab. 4.39: $K = 20$ [1], $p_w = 60$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

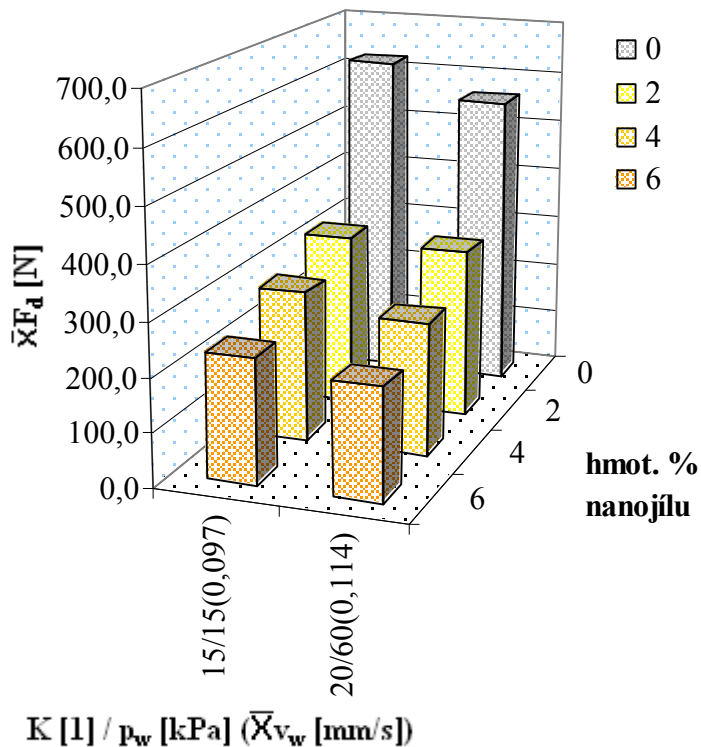
hmot. % nanojílu		F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{d} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{h} [mm]	d_{uf} [mm]
0	\bar{x}	560,5	8,05	1147,9	308	0,612	7,126	0,093	96,003	96,615	0,110	96,725
	s	179,8	0,03	407,7	30	0,019	1,931	0,030	0,019	0,001	0,011	0,011
	x_{max}	873,0	8,09	1912,8	374	0,653	9,854	0,166	96,031	96,618	0,132	96,747
	x_{min}	127,1	8,00	565,1	260	0,584	3,589	0,060	95,962	96,615	0,097	96,712
	Δ	745,9	0,09	1347,7	114	0,069	6,265	0,106	0,069	0,003	0,035	0,035
2	\bar{x}	319,0	8,06	1037,6	298	0,609	6,917	0,090	96,006	96,615	0,107	96,722
	s	27,5	0,02	277,7	44	0,017	1,090	0,013	0,017	0,000	0,007	0,007
	x_{max}	403,5	8,08	1523,0	436	0,642	8,811	0,112	96,040	96,616	0,118	96,733
	x_{min}	260,8	8,01	731,4	257	0,575	5,402	0,070	95,973	96,615	0,095	96,710
	Δ	142,7	0,07	791,7	179	0,067	3,409	0,042	0,067	0,001	0,023	0,023
4	\bar{x}	249,9	8,05	912,3	301	0,602	5,848	0,116	96,013	96,615	0,103	96,718
	s	45,0	0,02	375,7	30	0,013	1,822	0,050	0,013	0,000	0,006	0,006
	x_{max}	320,8	8,08	1501,3	365	0,641	8,527	0,284	96,032	96,616	0,114	96,729
	x_{min}	157,4	8,00	317,4	259	0,583	2,081	0,071	95,974	96,615	0,091	96,706
	Δ	163,4	0,08	1183,8	106	0,058	6,446	0,214	0,058	0,001	0,023	0,023
6	\bar{x}	209,4	8,05	774,7	312	0,581	4,541	0,155	96,034	96,615	0,105	96,721
	s	51,6	0,03	415,3	28	0,015	2,003	0,071	0,015	0,001	0,017	0,018
	x_{max}	299,6	8,10	1629,2	362	0,610	8,209	0,302	96,060	96,618	0,131	96,748
	x_{min}	119,4	7,99	301,0	268	0,555	1,937	0,072	96,005	96,615	0,075	96,690
	Δ	180,2	0,11	1328,3	94	0,055	6,272	0,230	0,055	0,003	0,056	0,058



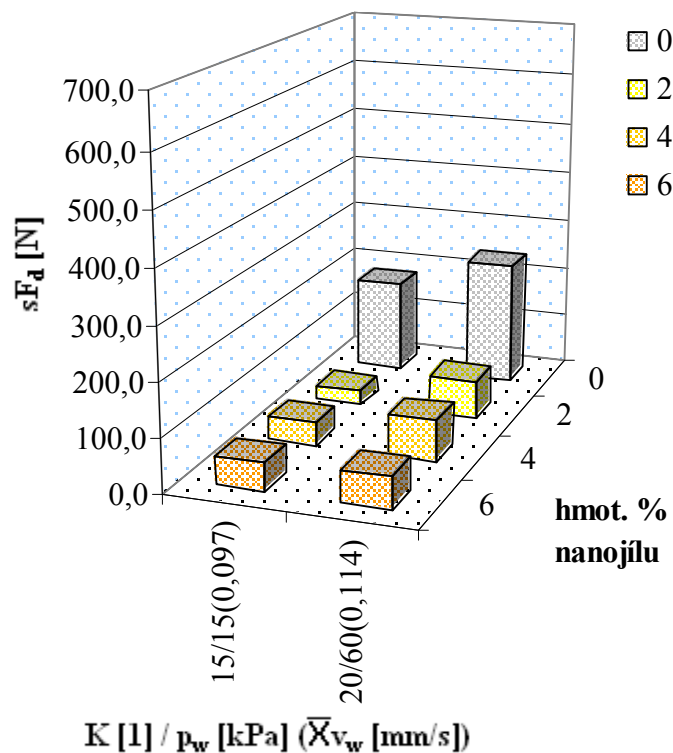
Obr. 4.60: Graf závislosti \bar{x}_{v_w} na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



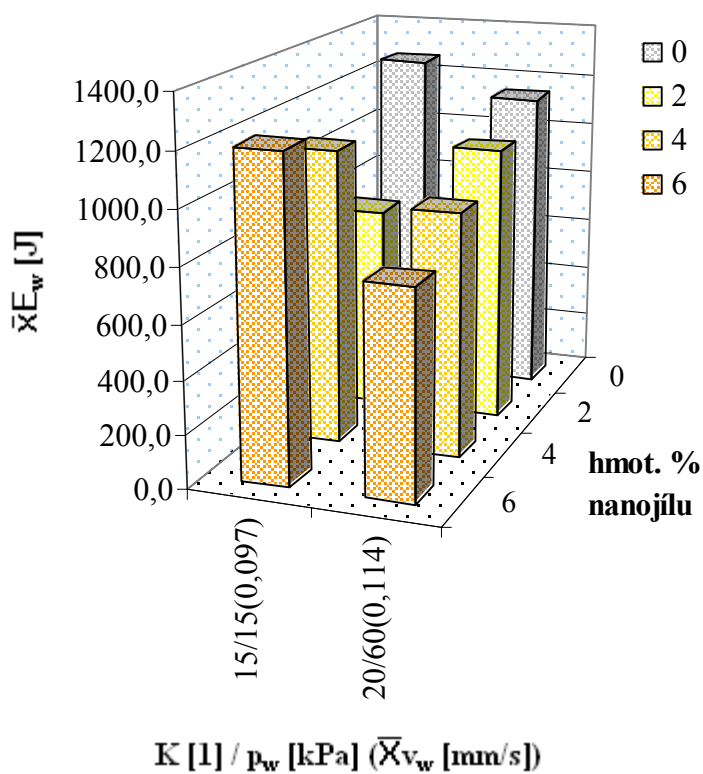
Obr. 4.61: Graf závislosti sv_w na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



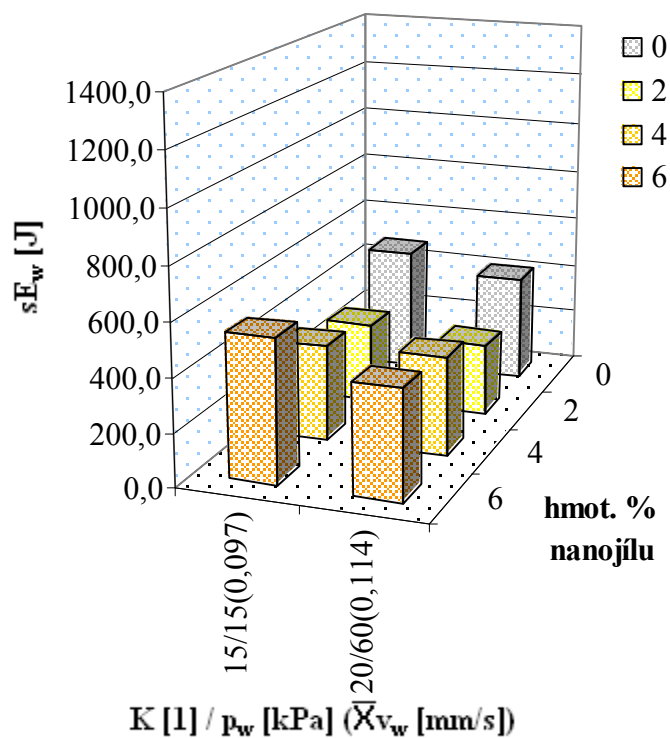
Obr. 4.62: Graf závislosti $\bar{X}F_d$ na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



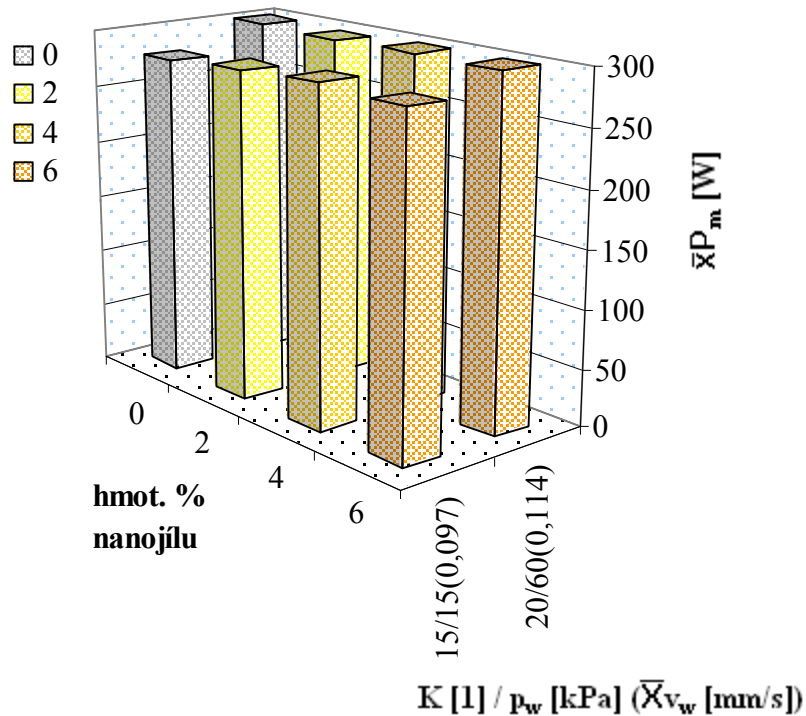
Obr. 4.63: Graf závislosti sF_d na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



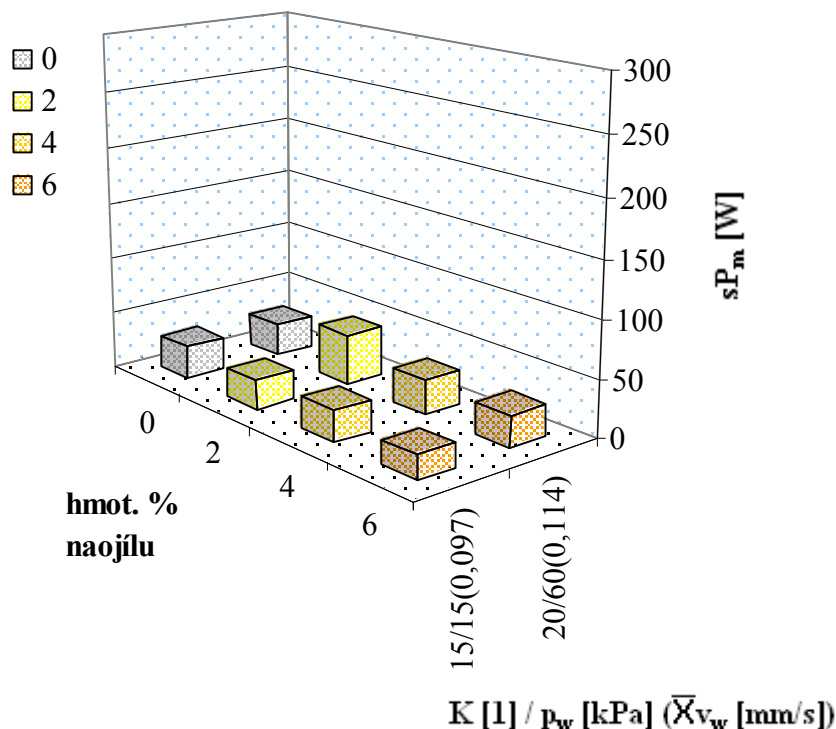
Obr. 4.64: Graf závislosti $\bar{X}E_w$ na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



Obr. 4.65: Graf závislosti sE_w na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



Obr. 4.66: Graf závislosti $\bar{X}P_m$ na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku



Graf 4.67: Graf závislosti sP_m na hmotnostním procentu plniva, stupni brzdění a svařovacím tlaku

4.18.2 Vyhodnocení

Průměrná svařovací rychlost

I při vyšším stupni brzdění a vyšším svařovacím tlaku docházelo ke kolísání střední hodnoty průměrné svařovací rychlosti (obr. 4.60) a proto se vypočítal aritmetický průměr \bar{X}_{v_w} středních hodnot průměrné svařovací rychlosti pro všechny koncentrace plniva a jeho hodnota je pro $K=20$ [1] a $p_w=60$ kPa rovna 0,114 mm/s, což je o 0,017 mm/ více oproti žádané hodnotě.

Destrukční síla

Střední hodnota destrukční síly vychází pro vyšší řídicí parametry svařovací rychlosti nižší, což je určitě částečně způsobeno větší svařovací rychlostí. Poměr střední hodnoty destrukční síly pro nižší a vyšší řídicí parametry se pohybuje v rozsahu 1,02 až 1,13 pro jednotlivé koncentrace nanojilu. Střední hodnota destrukční síly vychází pro nižší parametry větší v rozsahu 7,09 N až 64,9 N pro jednotlivé koncentrace nanojilu. Statistická analýza mezi porovnávanými daty

nenášla odlišnost pro jednotlivé koncentrace plniva (řádky v tab. 4.40). Mnohonásobné porovnávání destrukční síly (sloupce v tab. 4.40) pro nižší a vyšší řídicí parametry prokázalo shodnost mezi sériemi 0% - 2% a 4% - 6% (viz tab. 41).

Tab. 4.40: p-hodnoty metod statistické analýzy pro F_d

	p-hodnota [1]			
	A-D		F-test/LN	AN/K-W
	K = 15 [1] p _w = 15 kPa	K = 20 [1] p _w = 60 kPa		
0%	0	0,363	-/0,450	-/0,110
2%	0,020	0,043	-/0,008	-/0,399
4%	0	0,675	-/0,547	-/0,051
6%	0	0,042	-/0,774	-/0,119
BT/LN 0-6 %	-/0	-/0	-	-
AN/K-W 0-6 %	-/0	-/0	-	-

Tab. 4.41 Výsledky mnohonásobného porovnávání statistickými metodami pro data v tab. 4.40 – konstantní svařovací rychlost a proměnlivá koncentrace plniva pro F_d

	K = 15 [1] p _w = 15 kPa			K = 20 [1] p _w = 60 kPa		
	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>	<u>0</u>	<u>2</u>	<u>4</u>
<i>hmot. % nanojílů</i>						
0	-	-	-	-	-	-
2	•	-	-	•	-	-
4		•	-			-
6			•			•

“•” značka shodnosti skupin ; “_” značka skupiny srovnávané s ostatními skupinami; uvedena pouze 1/2 porovnávacího pole pro danou hodnotu faktoru

Energie svařování

Rozdíl střední hodnoty energie svařování pro nižší a vyšší řídicí parametry se pro jednotlivé koncentrace plniva pohybuje mezi - 273,4 J až 422,5 J. Střední hodnota energie vykazuje značnou rozkolísanost.

Maximální okamžitý výkon

Střední hodnoty maximálního okamžitého výkonu sonotrody pro vyšší řídicí parametry stouply oproti hodnotám pro nižší řídicí parametry pro jednotlivé koncentrace nanojílů v rozsahu 13 až 30 W (obr. 4.66). Poměr střední hodnoty výkonu pro vyšší a nižší řídicí parametry se pohybuje v rozsahu 1,05 až 1,11 pro jednotlivé koncentrace nanojílů. Střední hodnota výkonu je necitlivá ke změně koncentrace plniva.

Pro $p_w = 60$ kPa; $K = 20$ [1]:

Největší zjištěná odchylka d_{wf} od d_{wft} je $+ 3 \mu\text{m}$. Δd_u se pohybuje mezi 55 až 69 μm . $\bar{X}d_h$ je v rozsahu 103 až 110 μm .

4.18.3 Dílčí závěr

Od vyššího stupně brzdění a svařovacího tlaku se očekávala menší citlivost na vibrace od svařovaných tělísek a tím menší výkyvy svařovací rychlosti a tedy i větší pevnost svaru. Destrukční síla při nastavení svařovací rychlosti prostřednictvím $K = 20$ [1], $p_w = 60$ kPa se statisticky neliší od destrukční síly při rychlosti nastavené prostřednictvím $K = 15$ [1], $p_w = 15$ kPa pro jednotlivé koncentrace plniva. Mnohonásobným porovnáním síly mezi jednotlivými koncentracemi vyšla shoda sérií 0% - 2% a 4% a 6%. Střední hodnota destrukční síly byla větší v řádu desítek newtonů pro měření při $K = 15$ [1]. Podíl na tom má né zcela shodné nastavení svařovacích rychlostí a její nestabilita. Střední hodnota destrukční síly s rostoucí koncentrací nanojílů klesá. Průběh okamžité svařovací síly měřené na sonotrodě F_s pro neplněný polypropylen byl pro vyšší i nižší řídicí parametry téměř shodný. Lze konstatovat, že nárůst hodnoty řídicích parametrů K a p_w svařovací rychlosti nemá statisticky významný vliv na destrukční sílu.

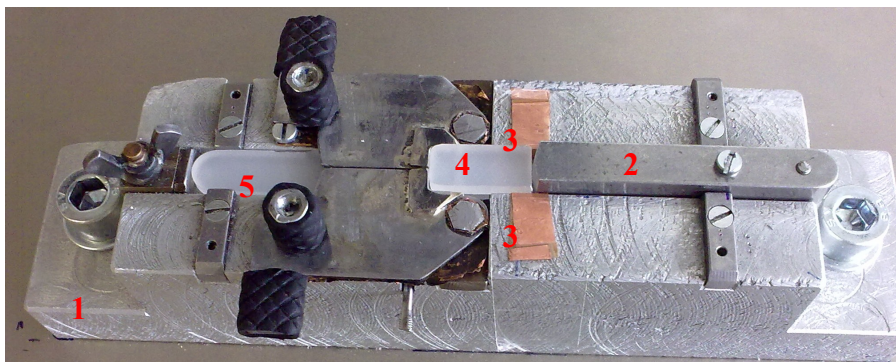
4.19 Měření vlivu změny délky tělíska 1

Při svařování docházelo ke značnému vibrování tělíska 1, resp. jeho volného konce podpíraného pružinkou. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření, které mělo za cíl zjistit zda délka tělíska 1, resp. jeho vibrace ovlivňují svařovací proces a

pevnost svaru. Proto bylo tělísko 1 zkráceno a střední hodnota jeho délky byla $\bar{X}_{l_{tk}} = 21,72$ mm (viz. kapitola 4.7 a příloha 2). Podmínky měření byly: 0% nanojílu; $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{wft} = 96,615$ mm.

4.19.1 Úprava svařovacího přípravku

Pro krátké tělísko muselo být použito ve svařovacím přípravku prodlouženého podélného vodícího prvku a příčných vodících prvků z tenké měděné fólie kvůli nedostatku prostoru mezi tělem přípravku a sonotrodou (obr. 4.68). Vůle mezi krátkým tělískem 1 a vodícími prvky přípravku byly nastaveny jako u dlouhého tělíska 1.



Obr. 4.68: Krátké tělísko 1 a dlouhé tělísko 2 umístěné ve svařovacím přípravku
1 - svařovací přípravek; 2 - prodloužený podélný vodící prvek; 3 - příčné vodící prvky z měděné fólie; 4 - krátké tělísko 1; 5 - dlouhé tělísko 2

4.19.2 Zpracované naměřené hodnoty

Naměřená data pro svařenec s krátkým tělískem 1 jsou uvedena v příloze 10. Data pro svařenec s dlouhým tělískem 1 pro dané podmínky svařování byla převzata z kapitoly 4.15 a přílohy 6.

Tab. 4.42: $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; krátké tělísko 1

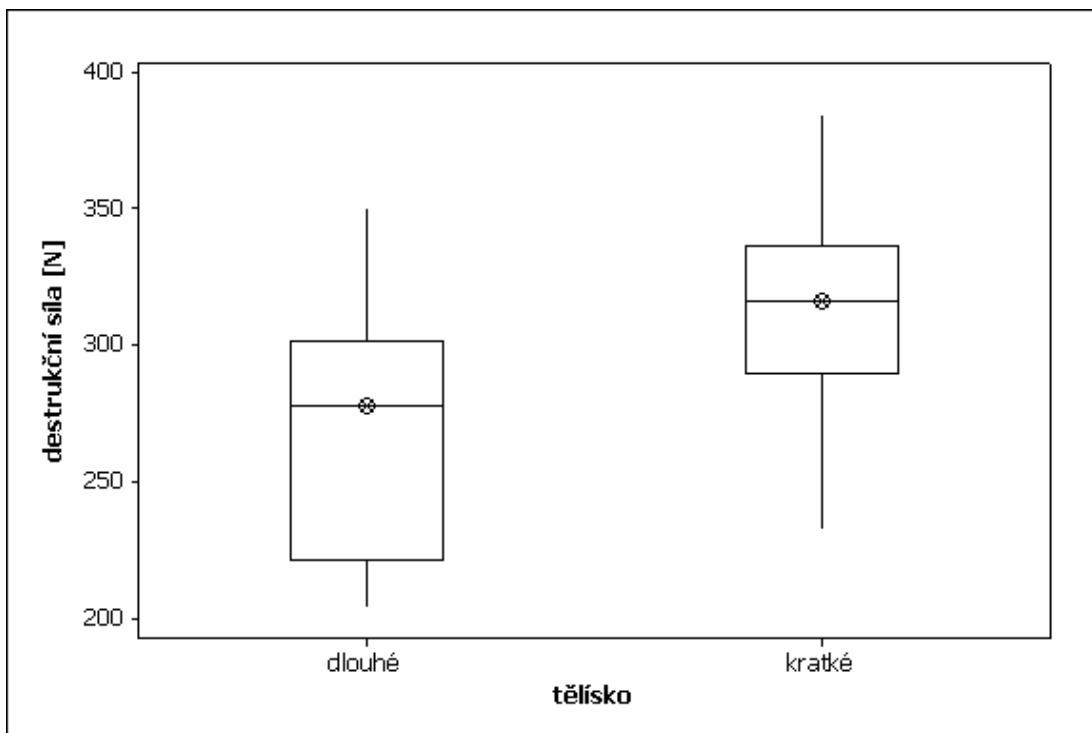
	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{d} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{t} [mm]	d_{ft} [mm]
\bar{x}	315,5	8,07	64,0	402	0,650	0,268	2,490	95,973	96,623	0,208	96,830
s	37,6	0,01	7,9	44	0,013	0,047	0,389	0,012	0,007	0,011	0,012
x_{max}	384,8	8,09	78,2	469	0,678	0,340	3,069	95,997	96,640	0,223	96,850
x_{min}	232,3	8,04	51,6	341	0,626	0,204	1,940	95,952	96,615	0,180	96,804
Δ	152,5	0,05	26,6	128	0,052	0,136	1,129	0,045	0,025	0,043	0,046

4.19.3 Vyhodnocení

Výrazné zkrácení tělíska 1 značně zvýšilo střední hodnotu průměrné svařovací rychlosti, která je pro dlouhé tělísko 1,384 mm/s a pro krátké 2,490 mm/s, což je 80% nárůst. U krátkého tělíska byla zjištěna střední hodnota destrukční síly 315,5 N, což je nárůst 16,3 % oproti síle 271,4 N pro dlouhé tělísko (obr. 4.69). Směrodatná výběrová odchylka destrukční síly pro krátké tělísko poklesla o 16,7 %. Statistická analýza prokázala odlišnost destrukční síly pro krátké a dlouhé tělísko (tab. 4.43). Pro krátké tělísko byla zjištěna střední hodnota energie svařování 64,0 J, došlo tedy k poklesu o 41,5 % oproti energii 109,3 J pro dlouhé tělísko a snížila se i směrodatná výběrová odchylka o 55,7 %. U krátkého tělíska stoupla střední hodnota maximálního okamžitého výkonu na 402 W, to je 9,5 % nárůst oproti hodnotě výkonu 367 W pro dlouhé tělísko a stoupla i hodnota výběrové směrodatné odchylky výkonu o 135 %.

Tab. 4.43: p-hodnoty statistických metod pro sílu F_d pro dlouhé a krátké tělísko 1

p-hodnota [1]			
A-D		F-test/LN	AN/K-W
tělísko			
dlouhé	krátké		
0,105	0,949	0,420 / 0,349	0,001 / -

Obr. 4.69: Krabicové grafy F_d pro krátké a dlouhé tělísko 1

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, ⊗ značka střední hodnoty

4.19.4 Dílčí závěr

Zkrácení délky zkušebního tělíska 1 vedlo ke snížení vibrací jeho volného konce, zvýšení průměrné svařovací rychlosti a pevnosti svaru. Proznačení krátkého tělíska 1 bylo rovněž nižší než pro dlouhé tělísko (viz. příloha 12). Nevýhodou zkráceného tělíska bylo jeho prokluzování v upínacích čelistech zkušebního zařízení. Během destrukčního testu docházelo u dlouhých tělísek k natáčení svaru vlivem přeplátování, což mohlo zkrácení tělíska ovlivnit a tím mohla být ovlivněná i destrukční síla. Délku zkušebních tělísek a jejich uložení v přípravku lze považovat za vhodnou pro experimentální měření.

4.20 Měření vlivu velikosti podélné vůle uložení

Během experimentů probíhalo svařování se zafixovanou polohou podélných vodících prvků a jejich pozice byla nastavena tak, aby vůle mezi nejdelším změřeným tělískem po zkrácení $l_{tdmax} = 65,42$ mm a pevně fixovanou pevnou zářázkou byla 0,1 mm. A protože minimální změřená délka zkráceného zkušebního tělíska byla $l_{tdmin} = 65,10$ mm, tak podélná vůle se mohla pohybovat v rozmezí 0,1 -

0,4 mm, což je výrazně větší vůle než je obecně doporučováno. Pro zjištění možného vlivu velikosti podélné vůle na pevnost svaru se provedlo doplňkové měření, kdy se podélná vůle nastavovala na pevnou hodnotu 0,1 mm a 0,4 mm pomocí spárových měrek pro každé tělísko 1 zvlášť. Poloha podélného vodícího prvku pro tělísko 2 byla pevně fixována, takže tělísko 2 bylo ukládáno do přípravku s proměnlivou vůlí. U tělíska 2 nedocházelo k intenzivnímu vibrování, protože se řádně opíralo o dno drážky a nebylo v přímém kontaktu se sonotrodou. Naměřená data při konstantně nastavené vůli se porovnávala s daty zjištěnými při proměnlivé vůli, která se mohla pohybovat v rozsahu 0,1 až 0,4 mm. Podmínky měření: 0% nanojílů; $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{wft} = 96,615$ mm.

4.20.1 Zpracované naměřené hodnoty

Naměřená data jsou uvedena v příloze 11. Data pro proměnlivou vůli 0,1 - 0,4 mm byla převzata z kapitoly 4.15 a z přílohy 6.

Tab. 4.44: 0%; $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm , $d_{wft} = 96,615$ mm; vůle 0,1 mm

	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{u1} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{u2} [mm]	d_{wf} [mm]
\bar{x}	258,1	8,11	102,4	427	0,644	0,395	1,775	95,973	96,617	0,181	96,798
s	48,0	0,01	28,9	58	0,013	0,142	0,441	0,013	0,003	0,017	0,017
x_{max}	404,5	8,15	180,3	503	0,674	0,753	2,245	95,996	96,625	0,214	96,829
x_{min}	189,0	8,08	82,0	332	0,622	0,277	0,887	95,944	96,615	0,153	96,769
Δ	215,5	0,07	98,3	171	0,052	0,476	1,358	0,052	0,010	0,061	0,060

Tab. 4.45: 0%; $K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm , $d_{wft} = 96,615$ mm; vůle 0,4 mm

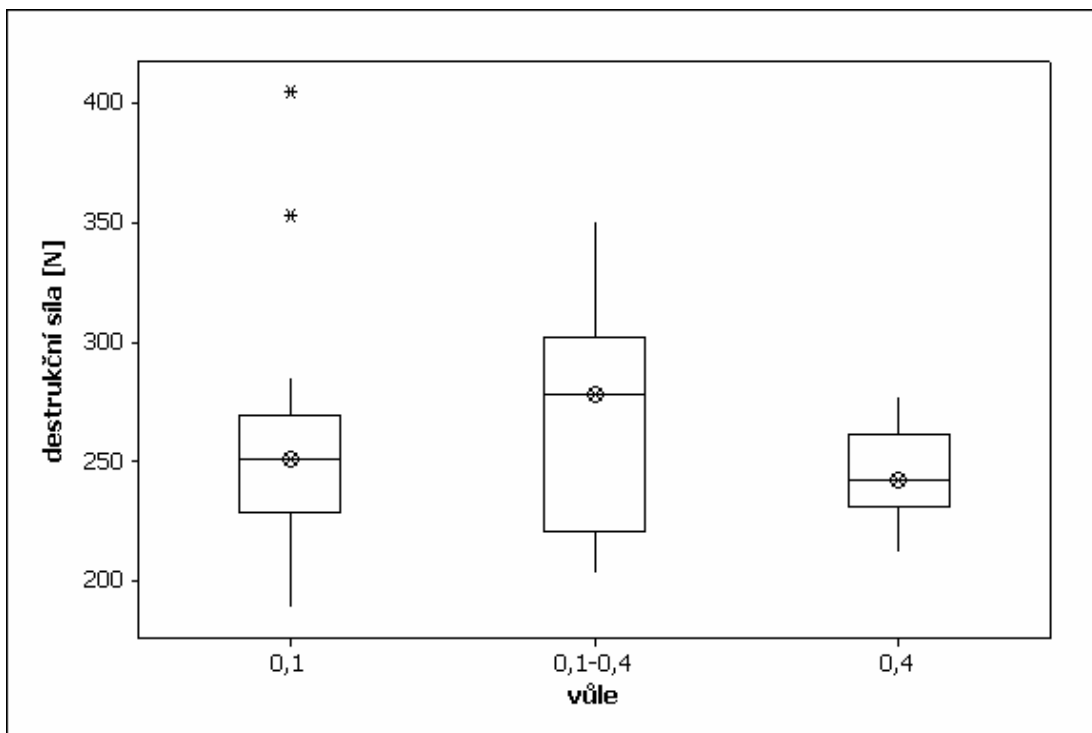
	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{u1} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{u2} [mm]	d_{wf} [mm]
\bar{x}	246,2	8,11	94,5	425	0,649	0,363	1,795	95,968	96,617	0,173	96,790
s	18,7	0,01	6,7	30	0,011	0,026	0,127	0,011	0,002	0,010	0,010
x_{max}	277,0	8,13	109,1	484	0,668	0,402	2,044	95,988	96,622	0,191	96,807
x_{min}	212,3	8,09	82,4	372	0,627	0,319	1,592	95,947	96,615	0,157	96,775
Δ	64,7	0,04	26,7	112	0,041	0,083	0,452	0,041	0,007	0,034	0,032

4.20.2 Vyhodnocení

Naměřená data pro vůli 0,1 a 0,4 mm se porovnávala s daty pro proměnlivou vůli 0,1 - 0,4 mm. Střední hodnoty průměrné svařovací rychlosti pro nastavené pevné vůle jsou větší přibližně o 0,4 mm/s oproti rychlosti 1,384 mm/s pro proměnlivou vůli 0,1 - 0,4 mm. Výběrová směrodatná odchylka průměrné svařovací rychlosti pro vůli 0,1 mm je výrazně vyšší než pro vůli 0,1 - 0,4 mm a vůli 0,4 mm. Střední hodnota destrukční síly 271,4 N pro proměnlivou vůli 0,1 - 0,4 mm byla neměnnou vůlí 0,1 mm zmenšena o 13,3 N a vůlí 0,4 mm o 25,1 N (obr. 4.70). Výběrová směrodatná odchylka síly je pro vůli 0,4 mm výrazně menší než u ostatních vůlí. Statistická analýza zjistila shodnost destrukční síly pro porovnávané vůle (tab. 4.46). Střední hodnota energie pro vůli 0,1 - 0,4 mm 109,3 J se vůlí 0,1 mm snížila na 102,4 J a vůlí 0,4 mm na 94,5 J. Střední hodnota výkonu pro vůli 0,1-0,4 mm 367W se vlivem vůle 0,1 mm zvýšila na 427 W a vůlí 0,4 mm na 425 W. Rovněž pro pevné vůle stouply i výběrové směrodatné odchylky.

Tab. 4.46: p-hodnoty statistických metod pro sílu F_d při rozdílných vůlích

p-hodnota [1]				
A-D			BT/LN	AN/K-W
vůle [mm]				
0,1	0,1-0,4	0,4		
0,008	0,105	0,688	- / 0,041	- / 0,109

Obr. 4.70: Krabicové grafy F_d pro různé podélné vůle tělíska 1

* odlehlá hodnota; meze krabice pro 25% a 75% percentil, ⊗ značka střední hodnoty

4.20.3 Dílčí závěr

Nastavení neměnné podélné vůle uložení tělíska 1 na hodnotu 0,1 mm a 0,4 mm ve svařovacím přípravku způsobilo snížení střední hodnoty destrukční síly, ale statistický rozdíl mezi skupinami nebyl potvrzen. Neměnnými vůlemi se nepatrně snížila střední hodnota energie svařování a zvýšila se střední hodnota maximálního okamžitého výkonu na sonotrodě. Proměnlivá vůle 0,1 - 0,4 mm nebyla s ohledem na pevnost spoje nevhodným řešením.

4.21 Vzhledové poškození svařovaných dílů

Při ultrazvukovém svařování je nebezpečí proznačení svařovaných dílů v místě dotyku pracovní plochy sonotrody se svařovanými díly, které vzniká přetížením materiálu od vibrací. V tomto místě pak nastane natavení materiálu, které díl nejen vzhledově poškodí, ale může ovlivnit i pevnost spoje. Ovlivnění pevnosti spoje může nastat uběhem dodávané energie potřebné na proznačení a znemožněním transportu vibrací přes proznačované místo. Pokud se svařuje metodou na vzdálenost, tak

natavení materiálu kontaktní plochy pod sonotrodou a jeho vytlačení do strany způsobí změnu velikosti mezery mezi díly po svaření. To rovněž ovlivní pevnost svarového spoje. Při experimentálních měřeních docházelo k poškozování tělíska 1, které bylo v kontaktu s pracovní plochou sonotrody a toto poškození plochy se hodnotilo pouze vizuálně a je tudíž zatíženo chybou hodnotitele. Fotografie svařenců jsou uvedeny v příloze 12.

4.21.1 Vyhodnocení

Změna stupně brzdění : Při $K = 3$ [1] (vyšší svařovací rychlost) byly tělíska lehce povrchově poškozeny. Snižováním svařovací rychlosti prostřednictvím zvyšování stupně brzdění docházelo ke snižování poškození tělísek až k jeho vymizení. Avšak při $K = 15$ [1] se objevilo poškození v intenzivní formě, kdy byla tělíska silně poškozována do hloubky.

Změna svařovacího tlaku: Zvýšení svařovacího tlaku (zvýšení svařovací rychlosti) nemělo na poškození tělísek výrazný vliv. Poškození tělísek bylo prakticky stále stejné.

Změna amplitudy: Zmenšení svařovací amplitudy vyvolalo zvětšení poškození pouze u dílů svařovaných při vyšší energii svařování (tedy pro stupeň brzdění 6 a 9 při $p_w = 15$ kPa).

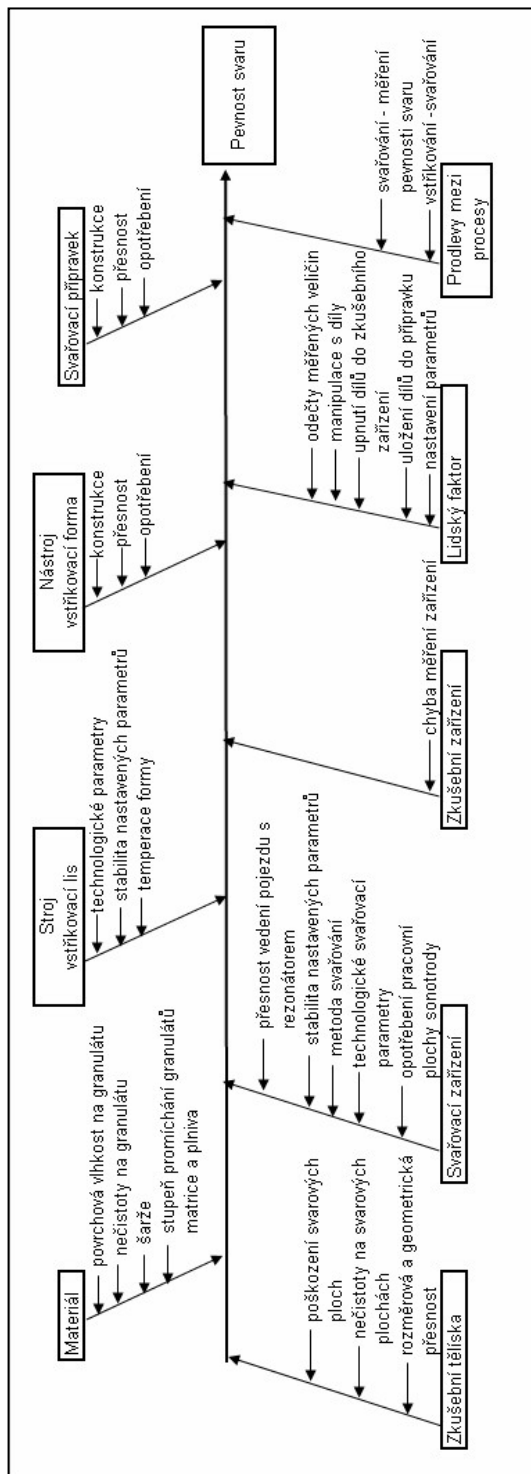
Vyšší K a p_w : Zvětšení hodnot řídicích parametrů nemělo na poškození tělísek vliv.

4.21.2 Dílčí závěr

Poškození kontaktní plochy tělísek 1 od pracovní plochy sonotrody vykazuje závislost na svařovacích podmínkách. Pokles svařovací amplitudy zvětšuje poškození u dílů svařovaných při vyšší energii dodané dílům vlivem delšího svařovacího času. Na poškození má také vliv velikost svařovací rychlosti. V určitém rozsahu rychlosti poškození zcela mizí. Procento nanojílu nemá na poškození výrazný vliv. Poškození tělísek bylo způsobeno velkým útlumem vibrací v houževnatém materiálu a také nedokonalostí kontaktní plochy na tělískách.

4.22 Přehled faktorů ovlivňujících pevnost svaru

Na pevnost svarového spoje má vliv velké množství faktorů, které jsou uvedeny v diagramu příčin a následků (obr. 4.71).



Obr. 4.71: Diagram příčin a následků pro pevnost svaru

5. Diskuze výsledků disertační práce

Diskuze výsledků disertační práce je souhrnem dílčích diskuzí a obsahuje i vyhodnocení z jednotlivých kapitol. Ultrazvukové svařování bylo zaměřeno na polypropylen plněný montmorillonitický exfoliovaným jílem (nanojíl) v koncentracích 2%, 4% a 6%, což pokrývá jeho běžně užívaný rozsah.

Experimentální část se zabývá nejen vlivem nanojílového plniva na pevnost svaru a na poškození svařovaných dílů při různých svařovacích podmínkách ultrazvukového svařování, ale poskytuje také informace týkající se samotného svařovacího procesu, vlivu nanojílu na pevnost plněného materiálu a na rozměry vstřikovaných dílů při neměnných podmínkách vstřikování.

Tahovou zkouškou bylo zjištěno, že pevnost v tahu vstřikovaného homopolymerního polypropylenu GB 005 plněného nanojílovým plnivem dodávaného v podobě Nanoblend koncentrátu 1001 s homopolymerním polypropylenovým nosičem vzrostla do 4% nanojílů o 0,7 MPa. Zvýšení koncentrace nanojílu na 6% již nepřineslo nárůst pevnosti. Statistická analýza vyhodnotila shodnost pevnosti série s 0% a 2% nanojílu. Dále vyhodnotila shodnost pevnosti mezi sériemi 2, 4 a 6% nanojílu. Změna pevnosti materiálu vlivem plniva nebyla při vyhodnocování pevnosti svaru brána v úvahu, protože plocha svaru se vlivem rozdílných svařovacích parametrů, nekonstantní svařovací rychlosti, útlumu ultrazvukových vibrací v samotném svařovaném materiálu, proznačováním a vlivem tvaru ploch zkušebních tělísek měnila a její obrys byl nepravidelný. Nárůst pevnosti svaru vlivem nárůstu pevnosti svařovaného materiálu je v porovnání s rozptylem naměřených hodnot destrukční síly malý.

Nanojíl zapříčiňoval při vstřikování zkušebních tělísek při neměnných vstřikovacích parametrech snížení jejich tloušťky v řádu mikrometrů na bocích a v řádu desítek mikrometrů v ose. Statistická analýza vyhodnotila statisticky významnou odlišnost mezi tloušťkou tělísek z neplněného a plněného polypropylenu. Vypočítaný průměrný rozdíl tloušťky mezi neplněnou sérií a plněnými sériemi je 42 μm pro tělísko s usměrňovačem energie a 33 μm pro tělísko bez usměrňovače.

Při ultrazvukovém svařování byl použit hydraulický brzdič pro zajištění konstantní rychlosti svařování, která je doporučována pro zlepšení svařovacího procesu vlivem zajištění konstantního tavení svarových ploch. Hydraulický brzdič

při svařování nezajistil konstantní svařovací rychlost, což negativně ovlivňovalo stabilitu svařovacího procesu. Zvláště při nízkých svařovacích rychlostech docházelo ke značným skokovým výkyvům okamžité svařovací rychlosti.

Protože polypropylen je houževnatý materiál, tak je špička usměrňovače energie snadno deformovatelná. Při svařování na relativní vzdálenost by mohla být pevnost svaru ovlivněna deformací špičky usměrňovače nebo proměnlivými podmínkami při nájezdu sonotrody na díl a spínáním ultrazvukových vibrací. Proto byla volena metoda svařování na absolutní vzdálenost, která zajišťuje konstantní výšku svařence. Protože ale tělíska z neplněného polypropylenu vykazovala vyšší tloušťku než z plněného, tak se rozdíl tloušťky při metodě svařování na konstantní vzdálenost projevil ve zvětšení mezery mezi svařenými tělísky z plněného polypropylenu. To způsobilo značný pokles pevnosti svaru. Proto byly provedeny měření při absolutní poloze sonotrody na konci fáze vlastního svařování, která poskytla stejnou nebo obdobně velkou mezeru, jež byla mezi svařenci z plněného polypropylenu. Tím bylo dosaženo obdobných podmínek jako při metodě svařování na relativní vzdálenost. Původní absolutní poloha sonotrody na konci fáze vlastního svařování se upravila o hodnotu $75\text{ }\mu\text{m}$, čímž tedy došlo ke zvýšení mezery mezi svařenými tělísky z neplněného polypropylenu. Hodnota $75\text{ }\mu\text{m}$ je součtem průměrných rozdílů tloušťky vypočítaných mezi tělísky z neplněného a plněného polypropylenu v jejich ose. Výstupem tohoto měření je opravný koeficient $\bar{x}_{r_{Fd}} = 0,756$ [1] pro destrukční sílu, $\bar{x}_{r_{Ew}} = 0,773$ [1] pro energii dodanou svařovaným tělískům a $\bar{x}_{r_{Pw}} = 1,112$ [1] pro maximální okamžitý výkon sonotrody. Násobením středních hodnot změřených veličin pro tělíska z neplněného polypropylenu příslušnými opravnými koeficienty lze orientačně získat hodnoty zmíněných veličin jako kdyby se tělíska z neplněného a plněného polypropylenu svařovala metodou na relativní vzdálenost. Především ale koeficient pro destrukční sílu vyjadřuje změnu pevnosti svarového spoje při svařování na absolutní vzdálenost tělísek z plněného polypropylenu, která byla vstřikována za shodných technologických podmínek jako tělíska z neplněného polypropylenu. Svařovací zařízení velice přesně odměřovalo polohu sonotrody a to bylo využito k vyhodnocení polohy sonotrody v okamžiku sepnutí ultrazvukových vibrací d_u . Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou d_u naměřenou při experimentech týkajících se vlivu změny stupně brzdění, svařovacího tlaku, amplitudy a vyšší hodnoty řídicích parametrů svařovací rychlosti je $197\text{ }\mu\text{m}$ pro

neplněná tělíska a 207 μm pro plněná tělíska. Pokud se od těchto hodnot odečte rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou tloušťky měřené v ose tělísek (u tělíska s usměrňovačem energie ve středu usměrňovače), která činí pro neplněná tělíska 39 μm a pro plněná 69 μm , získá se hodnota 158 μm pro neplněná a 138 μm pro plněná tělíska. Tyto hodnoty vypovídají o proměnlivosti pozice spínání vibrací při metodě spínání prostřednictvím přednastavené síly pro houževnatý materiál. Výchylka polohy spínání vibrací může být zapříčiněna například deformovaným usměrňovačem energie, kolísáním síly na pracovní ploše sonotrody v okamžiku sepnutí vibrací. Při metodě svařování na relativní vzdálenost by orientačně vypočítané hodnoty výrazně ovlivnily pevnost svaru. Lze tedy konstatovat, že použití svařování na absolutní vzdálenost pro polypropylen, daný tvar a velikost usměrňovače energie bylo vhodné.

Destrukční síla, energie svařování a okamžitý maximální výkon sonotrody vykazovaly velký rozptyl, což činilo obtíže při jejich vyhodnocování. Velký rozptyl byl pravděpodobně způsoben útlumem vibrací ve svařovaném plastu, proznačováním svařovaných tělísek a také nestabilitou svařovací rychlosti. U energie a výkonu se orientačně porovnávaly pouze jejich střední hodnoty, protože byly měřeny okrajově. Největší význam měla destrukční síla, pomocí které se vyhodnocovala pevnost svaru. Proto se pro destrukční sílu prováděla statistická analýza. Analýza zjistila statisticky významný rozdíl mezi destrukční silou pro neplněnou sérii a plněné série. Již ze středních hodnot destrukční síly je znatelný její velký pokles pro plněné série oproti neplněné sérii kvůli zvětšení mezery mezi svařenými tělisky vlivem změny jejich rozměrů od plniva. Mezi jednotlivými koncentracemi se objevují shody i neshody. Nejčastěji zjištěná shoda je pro koncentrace 2 a 4%. Střední hodnoty destrukční síly vykazují klesající trend s rostoucí koncentrací nanojílů. K poklesu destrukční síly dochází i vlivem snížení svařovací amplitudy, což je dané snížením energie dodané do svaru. Snížení amplitudy dochází ke zvětšení poškození dílů při nižších rychlostech svařování a tedy vyšší energii svařování.

Zjišťoval se také vliv velikosti řídicích parametrů (stupeň brzdění a svařovací tlak) rychlosti svařování na pevnost svaru a svařovací proces. Od vyšších hodnot se očekávala větší stabilita svařovací rychlosti, což nebylo experimentem potvrzeno.

Zvyšování stupně brzdění snižovalo svařovací rychlost, což bylo očekávané. Zvyšování svařovacího tlaku při konstantním stupni brzdění zvyšovalo svařovací rychlost, což způsobovalo pokles pevnosti svarového spoje. Tento trend probíhal jen do určitého tlaku, kde nastalo ustálení rychlosti a s ní se ustálila i destrukční síla, svařovací energie a okamžitý maximální výkon sonotrody. Zastavení nárůstu svařovací rychlosti i přes zvyšování svařovacího tlaku bylo dáno charakteristikou hydraulického brzdíče.

Intenzita poškození tělísek se měnila podle podmínek svařování a zcela nepoškozená byla pro nižší svařovací rychlosti. Přítomnost nanojílu nemá na poškození tělísek výrazný vliv.

Protože při svařování docházelo k silným vibracím tělíska, které bylo v kontaktu se sonotrodou, provedlo se doplňkové měření, kdy se toto tělísko výrazně zkrátilo. Zkrácením došlo k nárůstu střední hodnoty destrukční síly o 16,3 %, ale zase se výrazně hůře upínalo do běžných čelistí zkušebního zařízení. Druhé doplňkové měření bylo zaměřeno na velikost podélné vůle zmíněného tělíska. Protože se tělíska po vystříknutí zakracovala řezáním, měla toleranci přibližně $\pm 0,15$ mm, což způsobilo proměnlivou podélnou vůli 0,1 až 0,4 mm. Ta byla tedy větší než je obecně doporučováno. Proto se provedla měření při konstantní podélné vůli 0,1 mm a 0,4 mm, ale nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl destrukční síly mezi proměnlivou vůlí a pevnými vůlemi. Což vede k závěru, že tvar tělísek a proměnlivá vůle nebyly nevhodné pro experiment.

Svařování polypropylenu vykazuje značnou nestabilitu a proto v každém měření bylo vyhodnocováno 21 kusů svařenců. Pro snížení kolísání středních hodnot by bylo třeba provádět měření s větším množstvím vzorků.

6. Závěr

Disertační práce byla vypracována z důvodu nedostatku informací týkajících se ultrazvukového svařování plastu s obsahem moderního plniva, za které byl vybrán nanojíl rozptýlený v homopolymerním polypropylenovém nosiči. (tzv. nanoblend koncentrát) přidávaný do homopolymerní polypropylenové matrice. Nanojíl se užívá v nízkých koncentracích (2 - 6%) v porovnání s běžnými plnivy, což snižuje pravděpodobnost rovnoměrného rozptýlení granulí koncentráту mezi granulemi matrice a zvyšuje tak nároky na proces promíchávání. Pro vstřikování polypropylenu s nanojílovým plnivem jsou doporučeny výrobcem koncentráту technologické parametry vstřikování, které jsou oproti doporučovaným vstřikovacím parametrům čistého polypropylenu omezeny teplotní odolností nanojílu. Navíc nosný plast koncentráту, ve kterém je dispergován nanojíl, má určité vlastnosti a tak je matrice ovlivněna nanojílem i nosným plastem. Při neměnných parametrech vstřikování je nutné počítat se zmenšením rozměrů vstřikovaných dílů z polypropylenu plněného nanojílem oproti dílům z neplněného polypropylenu. Při metodě svařování na absolutní vzdálenost změna rozměrů vstřikovaných dílů vlivem plniva způsobí značnou redukci pevnosti svaru.

Při svařování houževnatých materiálů, kterým polypropylen je, je velice důležité dobře vážit nejen metodu svařování, ale i metodu spínání ultrazvukových vibrací. Příčinou je snadná deformovatelnost špičky usměrňovače energie ještě před iniciací ultrazvukových vibrací, která může výrazně ovlivnit výsledek svařovacího procesu.

Obecně se doporučuje pro svařování semikrystalických plastů zajištění konstantní svařovací rychlosti, která však u použitého ultrazvukového zařízení s pneumatickým pohonem nebyla zajištěna ani užitím hydraulického brzdění. Mezi možné příčiny lze zařadit menší rychlost tavení usměrňovače energie oproti nastavené svařovací rychlosti v kombinaci s malou silou na sonotrodě a výkyvy okamžité rychlosti svařování. Výkyvy svařovací rychlosti jsou pravděpodobně způsobené vibracemi svařovaných dílů a stlačitelností pracovního média v pneumatickém válci. Jako vhodnější se jeví užití svařovacího zařízení schopného zajistit konstantní svařovací rychlost prostřednictvím mechanické vazby. Navíc by odpadlo nastavování mnoha svařovacích parametrů.

Experimentální měření prokázala pokles pevnosti svaru v závislosti na nárůstu koncentrace nanojílů a mírné zvýšení pevnosti plněného materiálu vlivem plniva. Vliv nanojílů na poškození kontaktní plochy svařovaných dílů od pracovní plochy sonotrody není výrazný. Svařování polypropylenu plněného nanojílem je tedy možné, ale nelze ho doporučit. Pokud by bylo takové svařování nezbytně nutné, bylo by vhodné vyzkoušet frekvenci ultrazvukových vibrací 15 kHz, která je obecně doporučována pro semikrystalické plasty a použít svařovací zařízení zajišťující konstantní svařovací rychlost prostřednictvím mechanické vazby.

7. Seznam použité literatury

- [1] LENFELD, P. *Technologie II*. [online]. [cit. 2011-06-17]. Dostupný z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm>
- [2] KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. druhé vyd. Liberec: TU v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8.
- [3] Dad'ourek K. *Kompozitní materiály: druhy a jejich užití*. 1.vyd. Liberec: TU v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [4] Plasty a kaučuk 41.2004-03. s.12-14.
- [5] Vávra, V., Losos, Z. *Multimediální texty z mineralogie pro bakalářské studium*. [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.sci.muni.cz/mineralogie> >
- [6] <http://www.nanocor.com>. [cit. 2011-05-06].
- [7] <http://geologie.vsb.cz>. [cit. 2011-05-06].
- [8] *Product selection guide*. [online]. [cit. 2005]. Dostupný z WWW: <<http://www.polyone.com>>
- [9] *Nanoblend concentrates deliver on the promise of nanotechnology*. [online]. [cit. 2005]. Dostupný z WWW: <<http://www.polyone.com>>
- [10] *Guide to ultrasonic Plastics assembly*. [online]. [cit. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.dukcorp.com>>
- [11] Troughton, T. *A practical guide: Joining Plastic*. 2th ed., Willam A., 1997. ISBN 1884207170.
- [12] *Ultrasonic assembly of thermoplastic mouldings and semi-finished products*. [příručka od German Eletrical Association (ZVEI)].
- [13] *User's manual: Press/Thruster*. [online]. [cit. 2009]. Dostupný z WWW: <<http://www.duccorp.com>>
- [14] *How to use those fancy ultrasonic welding controls*. [online]. [cit. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.PTOnline.com> >.
- [15] Marcus, M. Troubleshooter: *What happend to your ultrasonic weld quality*. [online]. [cit. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.PTOnline.com> >.
- [16] *Graphical analysis helps find and fix ultrasonoc welding problems*. [online]. [cit. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.ptonline.com/articles/200509ts1.html>>.

- [17] *Branson-Part design for ultrasonic welding*. [online]. [cit. 2010]. Dostupný z WWW: <<http://www.Branson-PlasticsJoin.com>>
- [18] Grewell,D., Benatar, A., Park, J. *Plastics and composites welding handbook*. Hanser, Cincinatti, 2003. ISBN 9781569903131.
- [19] *A Major Advancement in Engineered Polymers*. [zdroj - zástupce firmy PolyOne v ČR]
- [20] *Injection Molding Processing Sheet*. [online]. [cit. 2005]. Dostupný z WWW: <<http://www.polyone.com>>
- [21] informační list produktu Mosten GB 005. [online]. [cit. 2009]. Dostupný z WWW:< <http://www.unipetrol.cz>>

8. Publikační činnost

1. Hušek, D.- Ausperger, A.- Lenfeld, P.: Simulace procesu tvarování výztuže pro pryskyřicové systémy, Technológia 2005, Bratislava, 2005, ISBN 80-227-2264-2
2. Hušek, D.- Horák, M. - Pikora, M.: Using of technology WIT for car handle, Juniormat 2005, Brno, 2005, ISBN 80-214-2984-4
3. Hušek, D.- Řehák, J.: Simulace vakuového tvarování pomocí softwaru PAM-FORM, XV. vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden, Liberec, 2005, ISBN 80-7083-975-9
4. Ausperger, A.- Hušek, D. - Lenfeld, P.: Simulace tvarování vyztužující pleteniny u RTM technologie, Vyztužené plasty, Karlovy Vary, 2005, ISSN 1214-6412
5. Horák, M.- Hušek, D.: P-V-T data exploitation in the plastic part quality evaluation, Juniormat 2005, Brno, 2005, ISBN 80-214-2984-4
6. Horák, M. - Hušek, D.: Rozměrová přesnost vstřikovaných dílů s kovovými zálisky, Technológia 2005, Bratislava, 2005, ISBN 80-227-2264-2
7. Horák, M.- Hušek, D.: Vliv řízení dotlaku na kvalitu plastových dílů, XV. vědecké sympozium TU Liberec - TU Dresden, Liberec, 2005, ISBN 80-7083-975-9

9. Seznam příloh a přílohy

Seznam příloh:

Příloha 1 - Vybrané vlastnosti plniva a matrice

Příloha 2 - Změřené délky zakrácených tělísek

Příloha 3 - Naměřené rozměry zkušebních těles, hodnoty napětí a poměrného
prodloužení (tahová zkouška)

Příloha 4 - Změřené tloušťky tělísek v jednotlivých místech měření

Příloha 5 - Naměřená data pro série 0% při $d_{wft}' = 96,540$ mm

Příloha 6 - Naměřená data - vliv změny stupně brzdění K

Příloha 7 - Naměřená data - vliv změny svařovacího tlaku p_w

Příloha 8 - Naměřená data - vliv změny amplitudy A_w

Příloha 9 - Naměřená data – při vyšším K a p_w

Příloha 10 - Naměřená data - vliv změny délky tělíska 1

Příloha 11 - Naměřená data – vliv změny vůle uložení pro tělísko 1

Příloha 12 - Zobrazení kontaktní plochy tělíska 1 se sonotrodou

Příloha 1 - Vybrané vlastnosti plniva a matrice

Vlastnosti PP-H s Nanoblend koncentrátem 1001 [19]

obsah Nanoblend TM 1001	0%	10%	15%	20%
Fyzikální vlastnosti				
měrná hmotnost [g/cm ³]	0,91	0,93	0,93	0,94
Mechanické vlastnosti				
napětí na mezi kluzu v tahu [MPa]	37	40	40	40
poměrné prodloužení na mezi kluzu [%]	26	15	14	15
modul pružnosti v tahu [MPa]	2050	2760	2980	3125
napětí na mezi kluzu v ohybu [MPa]	54	65	66	67
ohybový modul pružnosti [MPa]	1620	2170	2320	2460
rázová houževnatost dle Izoda (J/m při 23 °C)	21,7	21,7	21,7	21,7
Tepelné vlastnosti				
odolnost za tepla (°C při 0,46 MPa)	98	122	122	122
odolnost za tepla (°C při 1,8 MPa)	55	60	62	62
koefficient teplotní roztažnosti 10 ⁻⁵ (cm/cm/°C)	13,8	9,7	9	8,1

Hmotnostní procento nanojílu v Nanoblend koncentrátu 1001 zjištěné výpalem

Teplota výpalu [°C]	Hmotnostní procento nanojílu zjištěné výpalem
450°C	32,8
500°C	31,3
550°C	30,1
600°C	28,1

Přehled základních vlastností polypropylenu Mosten GB 005 [21]

Vlastnost	Jednotka	Typická hodnota	Zkušební metoda
index toku taveniny (230/2,16)	g/10 min	5.0	ISO 1133
napětí na mezi kluzu	MPa	34	ISO 527
celková tažnost	%	>100	ISO 527
ohybový modul	MPa	1550	ISO 178
vrubová houževnatost CHARPY 23°C	kJ/m ²	4.0	ISO 179
vrubová houževnatost CHARPY -20°C	kJ/m ²	-	ISO 179
teplota měknutí dle VICATA	°C	157	ISO 306
odolnost za tepla (1,8 MPa)	°C	56.000	ISO 75

Příloha 2 - Změřené délky zakrácených tělísek

Naměřená délka dlouhého tělíska

vzorek	l_d [mm]	vzorek	l_d [mm]	vzorek	l_d [mm]	vzorek	l_d [mm]	vzorek	l_d [mm]
1	65,34	11	65,10	21	65,28	31	65,31	41	65,42
2	65,30	12	65,36	22	65,32	32	65,29	42	65,27
3	65,27	13	65,24	23	65,23	33	65,31	43	65,24
4	65,30	14	65,20	24	65,28	34	65,32	44	65,28
5	65,19	15	65,21	25	65,28	35	65,32	45	65,37
6	65,25	16	65,21	26	65,21	36	65,32	46	65,35
7	65,28	17	65,26	27	65,30	37	65,23	47	65,21
8	65,32	18	65,27	28	65,29	38	65,30	48	65,21
9	65,27	19	65,18	29	65,29	39	65,26	49	65,26
10	65,20	20	65,33	30	65,22	40	65,20	50	65,21

Naměřená délka krátkého tělíska

vzorek	l_{tk} [mm]	vzorek	l_{tk} [mm]	vzorek	l_{tk} [mm]
1	21,69	8	21,78	15	21,74
2	21,82	9	21,73	16	21,66
3	21,75	10	21,73	17	21,72
4	21,73	11	21,64	18	21,70
5	21,77	12	21,62	19	21,71
6	21,69	13	21,76	20	21,68
7	21,78	14	21,72	21	21,77

Příloha 3 - Naměřené rozměry zkušebních těles, hodnoty napětí a poměrného prodloužení (tahová zkouška)

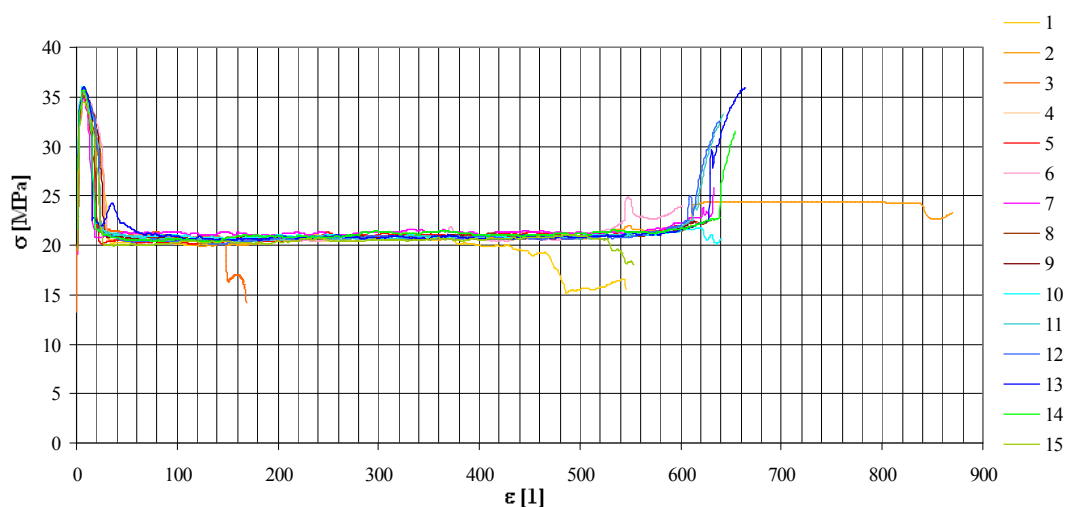
Naměřené a vypočítané střední hodnoty rozměrů a plochy příčného průřezu tělesa pro tahovou zkoušku pro jednotlivé koncentrace nanojílů

hmot. % nanojílů	místo měření	b_1 [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]	hmot. % nanojílů	místo měření	b_1 [mm]	h [mm]	S_0 [mm ²]
0	a	4,05	9,96	40,48	4	a	4,05	9,96	40,48
	b	4,07	9,94			b	4,07	9,94	
	c	4,08	9,96			c	4,08	9,96	
	\bar{x}	4,07	9,95			\bar{x}	4,07	9,95	
2	a	4,06	9,96	40,50	6	a	4,05	9,97	40,44
	b	4,07	9,94			b	4,06	9,94	
	c	4,08	9,95			c	4,07	9,97	
	\bar{x}	4,07	9,95			\bar{x}	4,06	9,96	

Napětí na mezi pevnosti v tahu a poměrná prodloužení na mezi pevnosti v tahu a při přetržení pro jednotlivá zkušební tělesa pro série 0% až 6% nanojílů

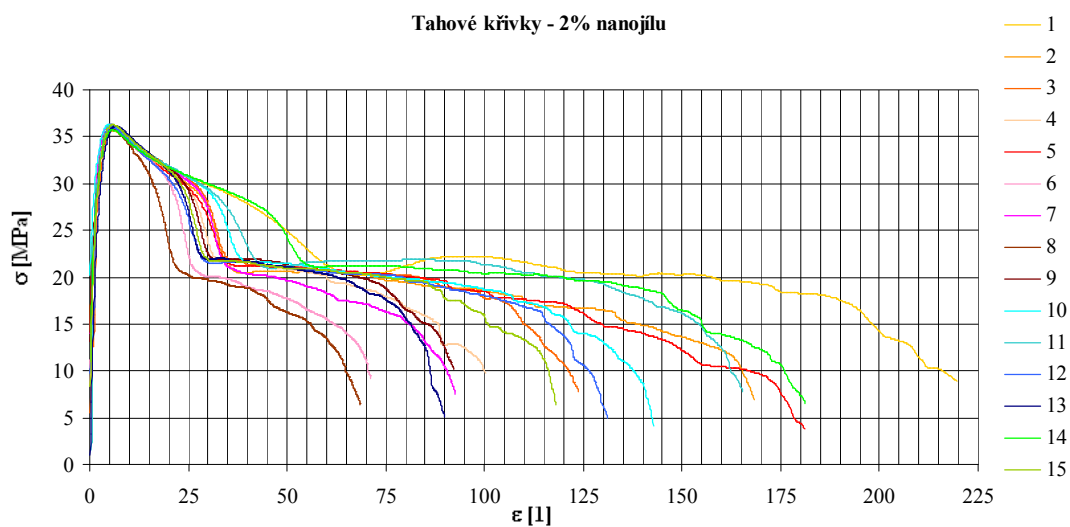
vzorek	hmot. % nanojílů											
	0			2			4			6		
	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	ϵ_B [%]
1	35,2	7,2	545,6	35,8	6,0	219,5	36,4	5,2	27,2	35,7	5,3	22,6
2	35,7	7,0	870,0	35,7	5,8	168,2	36,3	5,6	79,4	36,4	5,2	23,6
3	35,6	7,4	168,8	36,0	6,6	123,8	36,6	5,4	95,6	36,5	5,2	23,0
4	35,6	7,2	622,4	36,2	6,2	100,2	36,3	5,1	76,2	36,2	4,4	18,6
5	35,1	7,2	616,0	36,1	5,8	181,0	36,4	5,2	22,8	36,5	4,4	31,0
6	36,0	7,2	601,6	35,9	5,8	71,2	36,2	5,7	102,6	35,9	4,8	13,1
7	34,8	7,2	633,6	36,3	5,3	92,6	35,8	5,5	71,8	36,2	5,4	16,4
8	36,0	7,2	630,4	36,0	5,4	68,6	36,4	5,0	22,0	36,2	4,6	18,9
9	35,9	7,2	614,4	36,2	6,0	92,2	36,2	5,0	62,0	36,5	4,5	20,0
10	36,0	7,2	640,0	36,3	5,1	142,8	36,0	5,3	70,2	36,5	4,8	19,5
11	35,8	6,4	641,6	36,3	5,6	165,4	36,4	5,3	82,4	36,1	4,5	47,0
12	35,9	7,2	638,4	36,0	6,0	131,3	36,3	5,6	54,6	36,4	5,1	21,6
13	36,0	7,2	664,0	36,2	6,7	89,8	36,4	4,5	101,3	36,4	4,5	64,4
14	35,7	7,2	654,4	35,7	6,0	181,2	36,4	5,7	92,2	36,3	5,0	25,6
15	34,5	7,2	553,6	36,3	5,9	118,1	35,9	5,0	88,0	36,0	5,6	24,2

Tahové křivky - 0% nanojílů

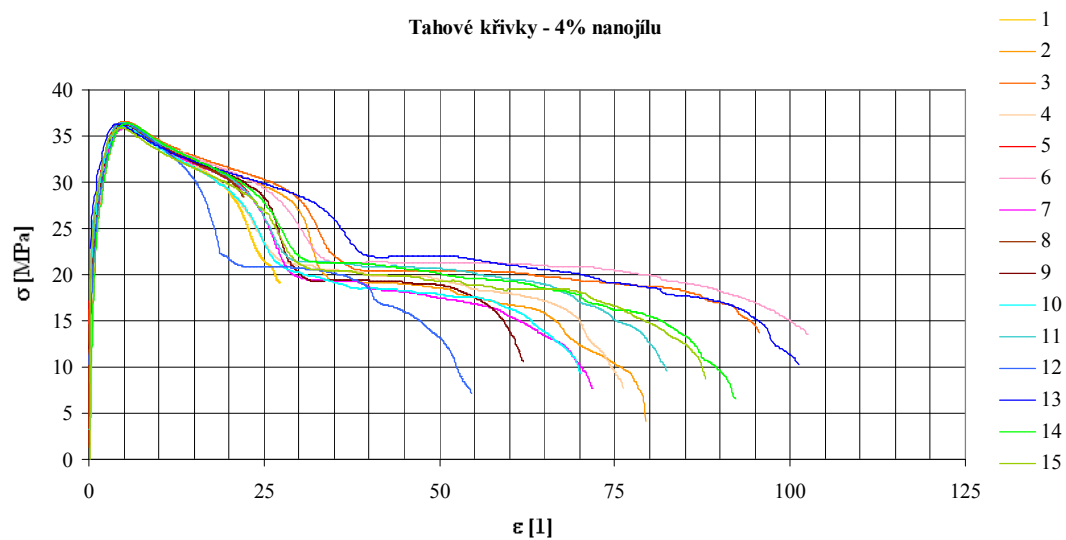


Graf závislosti tahového napětí σ na poměrném prodloužení ε pro 0% nanojílů v PP matrici

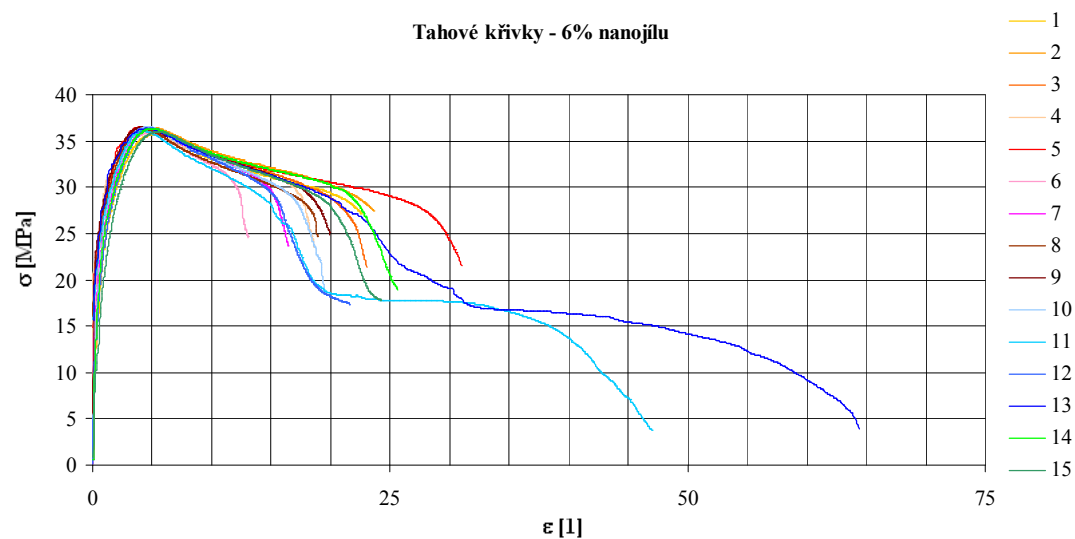
Tahové křivky - 2% nanojílů



Graf závislosti tahového napětí σ na poměrném prodloužení ε pro 2% nanojílů v PP matrici



Graf závislosti tahového napětí σ na poměrném prodloužení ϵ pro 4% nanojálu v PP matrici



Graf závislosti tahového napětí σ na poměrném prodloužení ϵ pro 6% nanojálu v PP matrici



Příloha 4 - Změřené tloušťky tělísek v jednotlivých místech měření

vzorek 1 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,995	3,903	4,003	5,005	4,938	5,042	4,050	3,937	4,053	3,958	3,875	3,960	3,909
2	3,995	3,903	4,001	5,011	4,941	5,043	4,054	3,930	4,047	3,958	3,875	3,959	3,911
3	3,995	3,904	4,003	5,010	4,941	5,045	4,055	3,933	4,049	3,957	3,879	3,960	3,910
4	3,997	3,904	4,002	5,009	4,942	5,045	4,051	3,931	4,048	3,957	3,874	3,960	3,910
5	3,996	3,900	4,001	5,010	4,942	5,044	4,054	3,929	4,048	3,960	3,876	3,959	3,912
6	3,994	3,901	4,001	5,009	4,942	5,041	4,055	3,930	4,048	3,959	3,877	3,962	3,911
7	3,994	3,901	4,003	5,008	4,941	5,041	4,056	3,933	4,050	3,958	3,879	3,960	3,910
8	3,996	3,902	4,001	5,008	4,941	5,042	4,054	3,931	4,047	3,960	3,876	3,961	3,912
9	3,994	3,900	4,001	5,009	4,943	5,043	4,052	3,928	4,046	3,959	3,876	3,963	3,911
10	3,996	3,902	4,001	5,009	4,940	5,042	4,053	3,931	4,046	3,958	3,875	3,960	3,909

vzorek 2 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,991	3,898	4,001	4,995	4,939	4,998	4,033	3,925	4,043	3,963	3,883	3,963	3,909
2	3,998	3,894	4,001	5,001	4,940	4,996	4,031	3,920	4,041	3,965	3,880	3,963	3,908
3	3,989	3,895	3,999	5,000	4,941	4,997	4,030	3,918	4,045	3,966	3,881	3,964	3,907
4	3,985	3,895	3,997	5,001	4,940	4,996	4,029	3,921	4,043	3,967	3,882	3,965	3,910
5	3,989	3,895	3,999	5,001	4,941	4,993	4,030	3,923	4,042	3,964	3,883	3,963	3,910
6	3,990	3,896	4,000	4,999	4,938	4,995	4,030	3,924	4,040	3,966	3,882	3,962	3,908
7	3,989	3,892	4,000	5,000	4,940	4,996	4,031	3,920	4,039	3,964	3,882	3,964	3,908
8	3,988	3,894	4,000	4,998	4,940	4,995	4,029	3,919	4,031	3,964	3,882	3,962	3,909
9	3,987	3,893	4,000	4,998	4,939	4,995	4,031	3,919	4,040	3,963	3,883	3,964	3,910
10	3,986	3,893	4,001	4,996	4,941	4,994	4,031	3,919	4,039	3,966	3,884	3,963	3,909

vzorek 3 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,030	3,894	4,001	5,074	4,965	4,957	4,075	3,947	4,043	3,967	3,887	3,966	3,917
2	4,030	3,893	4,000	5,079	4,960	4,958	4,071	3,944	4,041	3,966	3,878	3,963	3,918
3	4,027	3,893	3,997	5,078	4,960	4,956	4,070	3,946	4,041	3,967	3,878	3,963	3,917
4	4,027	3,894	3,996	5,081	4,959	4,957	4,072	3,947	4,041	3,967	3,880	3,963	3,918
5	4,025	3,890	3,997	5,080	4,959	4,956	4,068	3,942	4,041	3,965	3,878	3,964	3,917
6	4,025	3,892	3,996	5,081	4,959	4,956	4,070	3,941	4,042	3,970	3,878	3,964	3,916
7	4,026	3,891	3,996	5,079	4,959	4,955	4,069	3,941	4,041	3,970	3,880	3,966	3,915
8	4,026	3,890	3,992	5,079	4,961	4,956	4,069	3,939	4,041	3,969	3,878	3,963	3,915
9	4,023	3,889	3,997	5,078	4,962	4,953	4,071	3,942	4,041	3,969	3,879	3,963	3,916
10	4,026	3,888	3,996	5,081	4,964	4,953	4,068	3,938	4,040	3,965	3,879	3,963	3,915



vzorek 4 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,004	3,902	3,998	4,980	4,944	5,029	4,056	3,930	4,047	3,965	3,874	3,975	3,913
2	4,006	3,904	3,996	4,988	4,948	5,030	4,055	3,933	4,045	3,963	3,874	3,971	3,914
3	4,006	3,904	3,994	4,987	4,950	5,029	4,054	3,927	4,046	3,964	3,874	3,972	3,911
4	4,005	3,902	3,994	4,988	4,949	5,028	4,053	3,929	4,043	3,964	3,874	3,970	3,910
5	4,005	3,904	3,996	4,985	4,950	5,027	4,050	3,928	4,044	3,963	3,874	3,970	3,910
6	4,004	3,900	3,995	4,987	4,950	5,028	4,052	3,927	4,044	3,963	3,873	3,971	3,911
7	4,003	3,899	3,995	4,988	4,949	5,027	4,050	3,930	4,047	3,964	3,873	3,970	3,910
8	4,004	3,900	3,996	4,988	4,951	5,026	4,052	3,929	4,047	3,963	3,875	3,971	3,913
9	4,003	3,904	3,994	4,987	4,950	5,027	4,051	3,929	4,046	3,963	3,872	3,970	3,912
10	4,005	3,899	3,992	4,986	4,950	5,026	4,056	3,927	4,042	3,965	3,875	3,969	3,912

vzorek 5 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,990	3,897	4,004	5,025	4,938	5,023	4,045	3,912	4,040	3,968	3,878	3,965	3,91
2	3,987	3,898	4,004	5,025	4,931	5,028	4,046	3,915	4,041	3,967	3,877	3,966	3,91
3	3,984	3,890	4,004	5,024	4,931	5,027	4,047	3,913	4,040	3,967	3,879	3,967	3,91
4	3,985	3,892	4,004	5,024	4,932	5,028	4,046	3,913	4,041	3,964	3,876	3,967	3,91
5	3,987	3,894	4,004	5,023	4,931	5,028	4,044	3,913	4,042	3,965	3,875	3,967	3,907
6	3,987	3,890	4,003	5,025	4,931	5,029	4,047	3,912	4,041	3,964	3,875	3,964	3,908
7	3,988	3,893	4,003	5,024	4,932	5,027	4,048	3,912	4,043	3,964	3,875	3,967	3,907
8	3,988	3,899	4,004	5,023	4,932	5,028	4,045	3,912	4,042	3,969	3,873	3,966	3,907
9	3,986	3,893	4,004	5,023	4,929	5,030	4,047	3,912	4,042	3,964	3,873	3,963	3,906
10	3,986	3,894	4,005	5,024	4,930	5,029	4,045	3,914	4,040	3,965	3,873	3,966	3,908

vzorek 6 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,008	3,911	4,013	5,031	4,952	5,029	4,058	3,939	4,052	3,971	3,877	3,968	3,913
2	4,010	3,914	4,013	5,035	4,951	5,031	4,062	3,940	4,051	3,972	3,877	3,968	3,909
3	4,007	3,915	4,013	5,034	4,954	5,029	4,062	3,930	4,048	3,973	3,875	3,965	3,909
4	4,006	3,912	4,014	5,036	4,955	5,030	4,063	3,935	4,049	3,970	3,876	3,964	3,911
5	4,008	3,914	4,011	5,028	4,954	5,029	4,061	3,939	4,049	3,968	3,874	3,967	3,910
6	4,008	3,912	4,012	5,027	4,954	5,029	4,062	3,936	4,053	3,966	3,875	3,966	3,909
7	4,007	3,913	4,017	5,027	4,952	5,028	4,065	3,934	4,054	3,967	3,874	3,968	3,910
8	4,008	3,901	4,017	5,025	4,953	5,029	4,062	3,932	4,053	3,967	3,875	3,965	3,912
9	4,008	3,915	4,014	5,024	4,951	5,024	4,063	3,940	4,052	3,968	3,875	3,966	3,911
10	4,008	3,910	4,015	5,024	4,951	5,027	4,062	3,935	4,057	3,968	3,876	3,969	3,911



vzorek 7 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,009	3,910	4,006	5,013	4,954	5,039	4,064	3,945	4,057	3,963	3,877	3,969	3,910
2	4,007	3,913	4,005	5,012	4,957	5,037	4,062	3,944	4,056	3,964	3,876	3,969	3,909
3	4,005	3,907	4,006	5,011	4,956	5,038	4,061	3,938	4,054	3,966	3,874	3,969	3,910
4	4,005	3,906	4,004	5,012	4,956	5,038	4,063	3,939	4,055	3,963	3,875	3,966	3,910
5	4,005	3,908	4,005	5,013	4,956	5,037	4,061	3,940	4,052	3,964	3,874	3,969	3,909
6	4,005	3,908	4,005	5,011	4,957	5,038	4,062	3,938	4,057	3,964	3,874	3,968	3,909
7	4,005	3,904	4,006	5,012	4,956	5,039	4,062	3,941	4,055	3,961	3,874	3,968	3,912
8	4,006	3,907	4,007	5,007	4,951	5,040	4,062	3,943	4,056	3,961	3,874	3,969	3,910
9	4,003	3,907	4,006	5,011	4,951	5,039	4,061	3,940	4,053	3,961	3,873	3,968	3,910
10	4,006	3,908	4,006	5,012	4,951	5,038	4,061	3,940	4,055	3,960	3,874	3,967	3,909

vzorek 8 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,019	3,900	4,010	5,016	4,940	5,027	4,093	3,918	4,045	3,963	3,876	3,970	3,918
2	4,018	3,902	4,009	5,014	4,941	5,031	4,084	3,913	4,044	3,962	3,874	3,970	3,919
3	4,017	3,900	4,008	5,013	4,940	5,031	4,087	3,912	4,043	3,966	3,876	3,969	3,918
4	4,016	3,899	4,007	5,012	4,940	5,030	4,088	3,912	4,043	3,967	3,876	3,969	3,918
5	4,013	3,899	4,007	5,012	4,941	5,027	4,083	3,914	4,043	3,963	3,876	3,971	3,921
6	4,015	3,896	4,006	5,012	4,945	5,030	4,081	3,917	4,043	3,966	3,876	3,968	3,922
7	4,012	3,896	4,007	5,010	4,944	5,029	4,081	3,914	4,042	3,964	3,875	3,968	3,921
8	4,015	3,900	4,008	5,011	4,941	5,029	4,081	3,913	4,043	3,963	3,876	3,970	3,919
9	4,013	3,901	4,008	5,012	4,940	5,028	4,081	3,913	4,041	3,963	3,874	3,969	3,919
10	4,015	3,901	4,007	5,011	4,943	5,029	4,082	3,914	4,043	3,962	3,876	3,970	3,920

vzorek 9 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,012	3,920	4,012	5,016	4,963	5,084	4,038	3,937	4,059	3,964	3,876	3,969	3,907
2	4,013	3,918	4,013	5,015	4,962	5,085	4,039	3,942	4,064	3,963	3,876	3,970	3,907
3	4,016	3,919	4,013	5,015	4,964	5,084	4,038	3,940	4,054	3,964	3,874	3,969	3,906
4	4,014	3,920	4,012	5,014	4,963	5,085	4,040	3,940	4,053	3,964	3,876	3,970	3,907
5	4,015	3,915	4,009	5,013	4,964	5,084	4,041	3,934	4,056	3,963	3,875	3,970	3,910
6	4,013	3,913	4,009	5,010	4,963	5,083	4,039	3,936	4,054	3,963	3,875	3,969	3,909
7	4,010	3,913	4,007	5,011	4,958	5,080	4,040	3,935	4,056	3,963	3,876	3,968	3,909
8	4,013	3,913	4,014	5,010	4,958	5,082	4,039	3,934	4,055	3,964	3,875	3,969	3,910
9	4,007	3,915	4,011	5,012	4,965	5,081	4,037	3,936	4,054	3,963	3,876	3,969	3,909
10	4,008	3,915	4,010	5,011	4,966	5,082	4,039	3,936	4,054	3,964	3,874	3,969	3,907



vzorek 10 - 0%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,014	3,908	4,017	4,995	4,954	5,042	4,035	3,930	4,054	3,963	3,876	3,969	3,912
2	4,013	3,911	4,015	5,001	4,956	5,043	4,034	3,933	4,051	3,964	3,876	3,969	3,913
3	4,011	3,908	4,015	5,001	4,955	5,040	4,033	3,929	4,052	3,962	3,876	3,970	3,912
4	4,009	3,909	4,016	5,000	4,956	5,043	4,034	3,924	4,051	3,964	3,875	3,970	3,912
5	4,015	3,907	4,015	5,005	4,955	5,042	4,031	3,924	4,049	3,962	3,876	3,969	3,910
6	4,011	3,907	4,013	5,004	4,955	5,041	4,033	3,923	4,050	3,960	3,875	3,969	3,911
7	4,010	3,909	4,009	5,003	4,953	5,042	4,032	3,923	4,046	3,962	3,875	3,971	3,910
8	4,011	3,908	4,009	5,002	4,959	5,042	4,032	3,925	4,048	3,964	3,875	3,969	3,910
9	4,008	3,908	4,012	5,001	4,959	5,041	4,033	3,923	4,046	3,963	3,876	3,968	3,913
10	4,008	3,907	4,009	5,000	4,958	5,039	4,032	3,926	4,048	3,962	3,877	3,971	3,912

vzorek 1 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,999	3,875	4,009	5,075	4,925	5,030	4,063	3,889	4,050	3,959	3,843	3,962	3,894
2	3,997	3,872	4,008	5,075	4,926	5,031	4,062	3,893	4,048	3,957	3,843	3,962	3,895
3	3,995	3,872	4,005	5,071	4,925	5,026	4,060	3,890	4,046	3,959	3,841	3,960	3,895
4	3,998	3,872	4,008	5,072	4,926	5,027	4,060	3,889	4,047	3,960	3,846	3,962	3,894
5	3,995	3,874	4,007	5,074	4,927	5,027	4,063	3,891	4,046	3,953	3,842	3,960	3,896
6	3,997	3,871	4,006	5,075	4,923	5,024	4,061	3,888	4,047	3,954	3,840	3,960	3,895
7	3,997	3,873	4,007	5,074	4,922	5,025	4,059	3,887	4,045	3,954	3,841	3,961	3,895
8	4,000	3,872	4,006	5,072	4,923	5,026	4,063	3,887	4,047	3,953	3,840	3,958	3,893
9	3,999	3,870	4,003	5,073	4,923	5,025	4,061	3,886	4,045	3,953	3,841	3,959	3,895
10	4,004	3,871	4,005	5,074	4,922	5,025	4,061	3,888	4,047	3,952	3,840	3,959	3,894

vzorek 2 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,009	3,874	3,997	5,003	4,923	5,016	4,072	3,873	4,031	3,963	3,855	3,966	3,905
2	4,006	3,871	3,996	5,005	4,918	5,018	4,074	3,874	4,031	3,960	3,854	3,962	3,904
3	4,005	3,868	3,996	5,004	4,917	5,017	4,072	3,873	4,035	3,962	3,855	3,964	3,906
4	4,005	3,869	3,999	5,005	4,918	5,016	4,071	3,874	4,033	3,960	3,852	3,962	3,906
5	4,005	3,869	3,995	5,003	4,917	5,017	4,074	3,874	4,032	3,960	3,853	3,964	3,905
6	4,007	3,866	3,996	5,005	4,917	5,019	4,070	3,873	4,033	3,958	3,854	3,963	3,904
7	4,006	3,867	3,997	5,005	4,918	5,017	4,071	3,872	4,030	3,959	3,852	3,964	3,903
8	4,006	3,864	3,998	5,004	4,917	5,017	4,071	3,869	4,033	3,959	3,851	3,961	3,904
9	4,004	3,865	3,997	5,006	4,917	5,016	4,072	3,869	4,031	3,959	3,850	3,961	3,906
10	4,004	3,865	3,998	5,005	4,915	5,015	4,072	3,869	4,033	3,960	3,851	3,962	3,905



vzorek 3 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,013	3,874	3,997	5,033	4,929	5,015	4,088	3,899	4,042	3,963	3,853	3,967	3,884
2	4,015	3,874	3,995	5,032	4,931	5,017	4,084	3,896	4,039	3,960	3,854	3,964	3,884
3	4,014	3,875	3,995	5,033	4,930	5,016	4,083	3,898	4,041	3,959	3,852	3,964	3,885
4	4,016	3,874	3,995	5,031	4,931	5,016	4,083	3,895	4,039	3,959	3,853	3,965	3,884
5	4,013	3,875	3,996	5,030	4,930	5,015	4,084	3,891	4,040	3,958	3,854	3,966	3,886
6	4,013	3,876	3,996	5,029	4,929	5,014	4,082	3,887	4,041	3,960	3,850	3,963	3,885
7	4,015	3,876	3,995	5,028	4,923	5,015	4,078	3,887	4,037	3,958	3,846	3,966	3,885
8	4,008	3,878	3,994	5,027	4,925	5,014	4,078	3,889	4,038	3,957	3,847	3,965	3,884
9	4,008	3,875	3,995	5,024	4,924	5,013	4,079	3,890	4,038	3,958	3,848	3,966	3,886
10	4,009	3,877	3,995	5,025	4,924	5,014	4,077	3,888	4,037	3,957	3,850	3,965	3,885

vzorek 4 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,997	3,875	3,998	5,003	4,916	5,035	4,081	3,883	4,035	3,955	3,842	3,959	3,891
2	3,995	3,876	3,996	5,005	4,917	5,037	4,080	3,887	4,035	3,954	3,842	3,960	3,890
3	3,995	3,876	3,990	5,002	4,917	5,036	4,080	3,884	4,034	3,953	3,840	3,955	3,890
4	3,994	3,876	3,996	5,000	4,915	5,037	4,078	3,881	4,031	3,955	3,839	3,953	3,889
5	3,993	3,874	3,995	5,001	4,916	5,036	4,080	3,880	4,035	3,956	3,838	3,954	3,891
6	3,992	3,873	3,996	5,000	4,917	5,036	4,079	3,882	4,034	3,953	3,837	3,950	3,891
7	3,994	3,877	3,996	5,001	4,914	5,037	4,075	3,884	4,033	3,952	3,836	3,953	3,890
8	3,994	3,876	3,995	5,005	4,916	5,031	4,073	3,886	4,034	3,951	3,835	3,956	3,889
9	3,993	3,877	3,995	5,001	4,917	5,032	4,076	3,882	4,033	3,952	3,834	3,957	3,889
10	3,992	3,877	3,995	5,007	4,915	5,030	4,073	3,882	4,033	3,952	3,835	3,955	3,890

vzorek 5 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,997	3,879	4,025	5,060	4,910	5,017	4,069	3,891	4,050	3,964	3,847	3,960	3,898
2	3,996	3,876	4,018	5,059	4,910	5,016	4,065	3,894	4,048	3,963	3,847	3,961	3,897
3	3,995	3,878	4,016	5,059	4,909	5,015	4,068	3,888	4,048	3,963	3,846	3,959	3,898
4	3,995	3,876	4,016	5,056	4,909	5,015	4,068	3,886	4,047	3,962	3,845	3,960	3,897
5	3,994	3,874	4,015	5,055	4,910	5,014	4,065	3,888	4,050	3,963	3,842	3,961	3,896
6	3,993	3,880	4,015	5,053	4,912	5,012	4,064	3,885	4,048	3,963	3,844	3,960	3,898
7	3,995	3,872	4,013	5,053	4,911	5,013	4,066	3,887	4,051	3,960	3,843	3,957	3,896
8	3,993	3,873	4,012	5,051	4,912	5,011	4,067	3,886	4,048	3,960	3,845	3,959	3,897
9	3,994	3,878	4,012	5,051	4,911	5,010	4,066	3,889	4,050	3,962	3,843	3,959	3,898
10	3,993	3,870	4,014	5,050	4,910	5,009	4,066	3,889	4,053	3,960	3,845	3,960	3,896



vzorek 6 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,028	3,901	4,001	5,025	4,941	5,072	4,075	3,902	4,039	3,965	3,846	3,962	3,883
2	4,027	3,896	4,001	5,023	4,941	5,069	4,074	3,904	4,036	3,962	3,845	3,964	3,885
3	4,028	3,896	4,000	5,024	4,943	5,067	4,075	3,900	4,038	3,964	3,844	3,963	3,883
4	4,028	3,893	4,002	5,025	4,942	5,068	4,076	3,897	4,036	3,963	3,846	3,964	3,882
5	4,027	3,892	4,001	5,025	4,942	5,068	4,072	3,898	4,035	3,963	3,845	3,962	3,885
6	4,028	3,888	4,001	5,024	4,943	5,065	4,072	3,896	4,036	3,960	3,847	3,962	3,885
7	4,026	3,889	4,002	5,025	4,942	5,067	4,072	3,897	4,034	3,961	3,843	3,959	3,884
8	4,026	3,889	3,999	5,023	4,940	5,067	4,077	3,899	4,035	3,960	3,844	3,963	3,886
9	4,026	3,891	4,001	5,020	4,941	5,066	4,076	3,897	4,035	3,961	3,842	3,964	3,886
10	4,025	3,888	4,001	5,019	4,940	5,066	4,075	3,895	4,034	3,960	3,842	3,963	3,885

vzorek 7 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,986	3,868	3,998	4,987	4,915	5,013	4,126	3,870	4,034	3,972	3,847	3,966	3,881
2	3,987	3,866	4,000	4,988	4,913	5,018	4,127	3,869	4,036	3,972	3,847	3,965	3,880
3	3,988	3,866	3,997	4,988	4,911	5,019	4,124	3,866	4,034	3,974	3,845	3,962	3,879
4	3,987	3,865	3,998	4,988	4,912	5,018	4,125	3,867	4,036	3,971	3,844	3,962	3,880
5	3,985	3,864	3,997	4,986	4,913	5,017	4,126	3,866	4,034	3,972	3,843	3,963	3,880
6	3,987	3,867	3,996	4,988	4,913	5,018	4,122	3,867	4,034	3,970	3,844	3,963	3,883
7	3,987	3,864	3,997	4,986	4,912	5,017	4,124	3,869	4,034	3,970	3,845	3,962	3,882
8	3,987	3,865	3,998	4,987	4,912	5,018	4,125	3,871	4,032	3,970	3,846	3,961	3,881
9	3,985	3,861	3,997	4,986	4,911	5,017	4,124	3,868	4,035	3,969	3,844	3,964	3,883
10	3,986	3,867	3,996	4,985	4,912	5,016	4,122	3,868	4,037	3,967	3,842	3,963	3,883

vzorek 8 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,008	3,877	4,004	5,061	4,926	5,024	4,046	3,889	4,038	3,956	3,852	3,964	3,900
2	4,008	3,882	4,007	5,065	4,928	5,025	4,043	3,889	4,037	3,956	3,851	3,962	3,898
3	4,006	3,881	4,003	5,064	4,927	5,023	4,041	3,888	4,037	3,955	3,852	3,963	3,898
4	4,007	3,881	4,000	5,064	4,927	5,024	4,044	3,883	4,038	3,954	3,852	3,960	3,899
5	4,002	3,879	4,001	5,065	4,926	5,023	4,045	3,886	4,039	3,954	3,852	3,959	3,898
6	4,003	3,881	4,001	5,064	4,926	5,022	4,045	3,888	4,036	3,955	3,853	3,964	3,896
7	4,006	3,878	4,002	5,064	4,924	5,020	4,044	3,889	4,040	3,952	3,852	3,964	3,897
8	4,006	3,876	4,001	5,063	4,924	5,021	4,044	3,887	4,037	3,955	3,851	3,962	3,897
9	4,004	3,877	4,002	5,061	4,923	5,021	4,041	3,886	4,039	3,955	3,851	3,963	3,898
10	4,005	3,874	4,002	5,062	4,922	5,023	4,043	3,886	4,040	3,955	3,851	3,960	3,898



vzorek 9 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,013	3,871	4,002	5,024	4,924	5,000	4,133	3,876	4,036	3,960	3,844	3,961	3,882
2	4,009	3,868	4,002	5,025	4,923	5,001	4,136	3,879	4,039	3,959	3,845	3,961	3,882
3	4,009	3,870	4,000	5,025	4,923	5,000	4,133	3,881	4,034	3,958	3,844	3,962	3,883
4	4,008	3,868	4,000	5,026	4,919	4,997	4,131	3,875	4,036	3,958	3,839	3,959	3,884
5	4,011	3,868	4,000	5,025	4,918	4,997	4,134	3,875	4,033	3,958	3,839	3,960	3,885
6	4,006	3,867	3,999	5,022	4,918	4,995	4,136	3,876	4,032	3,958	3,840	3,958	3,884
7	4,010	3,869	4,000	5,024	4,919	4,996	4,133	3,875	4,030	3,958	3,840	3,959	3,884
8	4,008	3,869	4,000	5,023	4,918	4,996	4,133	3,874	4,032	3,958	3,841	3,958	3,883
9	4,007	3,870	4,000	5,024	4,917	4,995	4,130	3,877	4,033	3,957	3,841	3,960	3,881
10	4,008	3,871	3,999	5,023	4,917	4,994	4,130	3,875	4,034	3,957	3,840	3,959	3,882

vzorek 10 - 2%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,993	3,874	4,009	4,925	4,921	5,036	4,044	3,884	4,043	3,958	3,842	3,964	3,885
2	3,996	3,876	4,005	4,928	4,922	5,033	4,045	3,884	4,044	3,957	3,839	3,965	3,886
3	3,994	3,873	4,004	4,928	4,924	5,032	4,041	3,880	4,042	3,959	3,839	3,965	3,885
4	3,994	3,869	4,004	4,927	4,923	5,032	4,042	3,883	4,044	3,958	3,839	3,962	3,884
5	3,994	3,872	4,004	4,926	4,922	5,031	4,043	3,881	4,042	3,959	3,840	3,962	3,884
6	3,993	3,871	4,004	4,926	4,920	5,030	4,043	3,882	4,042	3,955	3,839	3,964	3,886
7	3,992	3,870	4,004	4,925	4,923	5,032	4,042	3,881	4,042	3,954	3,840	3,962	3,886
8	3,992	3,872	4,002	4,924	4,923	5,031	4,042	3,882	4,045	3,955	3,837	3,961	3,884
9	3,991	3,870	4,007	4,923	4,920	5,030	4,042	3,882	4,043	3,953	3,837	3,962	3,885
10	3,991	3,870	4,005	4,923	4,922	5,029	4,041	3,881	4,043	3,956	3,836	3,963	3,885

vzorek 1 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,993	3,876	4,026	4,992	4,926	5,024	4,070	3,897	4,061	3,961	3,844	3,962	3,889
2	3,993	3,878	4,026	4,998	4,927	5,017	4,073	3,898	4,063	3,963	3,846	3,960	3,889
3	3,992	3,880	4,026	4,999	4,924	5,021	4,072	3,899	4,063	3,965	3,845	3,961	3,888
4	3,993	3,875	4,027	4,998	4,924	5,020	4,068	3,896	4,062	3,963	3,842	3,962	3,889
5	3,991	3,877	4,027	4,997	4,923	5,019	4,070	3,896	4,062	3,965	3,846	3,962	3,891
6	3,991	3,877	4,025	4,990	4,923	5,020	4,069	3,896	4,061	3,964	3,845	3,961	3,890
7	3,991	3,874	4,028	4,989	4,922	5,020	4,069	3,896	4,061	3,964	3,845	3,961	3,890
8	3,991	3,875	4,026	4,988	4,918	5,021	4,073	3,898	4,063	3,962	3,844	3,961	3,889
9	3,991	3,872	4,024	4,988	4,921	5,024	4,071	3,896	4,063	3,960	3,844	3,961	3,888
10	3,991	3,875	4,022	4,987	4,924	5,023	4,070	3,898	4,060	3,962	3,844	3,960	3,891



vzorek 2 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,013	3,875	4,011	4,997	4,926	5,027	4,040	3,885	4,046	3,962	3,849	3,965	3,886
2	4,015	3,872	4,010	4,996	4,921	5,032	4,037	3,882	4,047	3,961	3,848	3,965	3,884
3	4,013	3,871	4,010	4,995	4,922	5,031	4,037	3,883	4,046	3,962	3,849	3,964	3,885
4	4,015	3,870	4,011	4,994	4,921	5,032	4,037	3,882	4,046	3,964	3,844	3,964	3,884
5	4,012	3,870	4,011	4,995	4,919	5,031	4,038	3,880	4,045	3,963	3,846	3,966	3,883
6	4,014	3,871	4,011	4,995	4,921	5,029	4,037	3,879	4,045	3,962	3,848	3,965	3,884
7	4,011	3,872	4,010	4,995	4,920	5,029	4,036	3,880	4,044	3,962	3,844	3,964	3,883
8	4,009	3,869	4,011	4,996	4,922	5,030	4,035	3,880	4,045	3,960	3,845	3,964	3,881
9	4,010	3,870	4,011	4,997	4,922	5,029	4,035	3,878	4,043	3,960	3,845	3,965	3,884
10	4,011	3,871	4,010	4,995	4,922	5,030	4,035	3,879	4,045	3,961	3,847	3,963	3,884

vzorek 3 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,994	3,867	4,007	5,024	4,907	5,039	4,042	3,882	4,046	3,967	3,837	3,956	3,884
2	3,990	3,869	4,006	5,022	4,905	5,039	4,044	3,882	4,049	3,960	3,836	3,956	3,884
3	3,994	3,864	4,006	5,020	4,905	5,038	4,043	3,881	4,044	3,959	3,833	3,958	3,886
4	3,993	3,868	4,007	5,019	4,904	5,038	4,045	3,878	4,042	3,958	3,836	3,956	3,884
5	3,997	3,864	4,004	5,018	4,905	5,038	4,042	3,882	4,045	3,959	3,835	3,954	3,885
6	3,998	3,864	4,005	5,018	4,905	5,037	4,039	3,879	4,043	3,955	3,834	3,953	3,883
7	3,995	3,863	4,005	5,017	4,904	5,038	4,038	3,879	4,045	3,958	3,834	3,953	3,882
8	3,998	3,863	4,005	5,016	4,904	5,038	4,041	3,879	4,043	3,957	3,834	3,954	3,882
9	3,993	3,863	4,005	5,016	4,903	5,037	4,041	3,879	4,044	3,958	3,832	3,954	3,881
10	3,995	3,861	4,002	5,017	4,904	5,036	4,040	3,879	4,042	3,959	3,834	3,956	3,884

vzorek 4 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,997	3,870	4,003	5,033	4,904	5,015	4,036	3,880	4,034	3,960	3,845	3,961	3,881
2	3,999	3,869	4,000	5,031	4,907	5,019	4,034	3,884	4,033	3,960	3,845	3,962	3,884
3	3,995	3,866	4,000	5,027	4,907	5,019	4,035	3,882	4,032	3,960	3,844	3,960	3,882
4	3,994	3,867	4,001	5,028	4,908	5,019	4,034	3,880	4,031	3,959	3,842	3,961	3,882
5	3,995	3,870	4,002	5,030	4,908	5,019	4,032	3,879	4,031	3,957	3,844	3,963	3,883
6	3,994	3,867	4,002	5,028	4,907	5,018	4,035	3,879	4,032	3,959	3,843	3,961	3,884
7	3,992	3,865	4,002	5,029	4,907	5,019	4,032	3,878	4,033	3,955	3,843	3,964	3,882
8	3,992	3,865	4,000	5,028	4,906	5,018	4,032	3,877	4,034	3,959	3,843	3,963	3,882
9	3,994	3,864	4,000	5,025	4,907	5,020	4,032	3,877	4,030	3,960	3,844	3,963	3,881
10	3,994	3,863	4,000	5,026	4,907	5,018	4,034	3,877	4,029	3,961	3,843	3,962	3,882



vzorek 5 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,996	3,872	3,999	5,041	4,902	4,952	4,064	3,881	4,020	3,963	3,849	3,964	3,888
2	3,995	3,872	4,003	5,044	4,905	4,951	4,065	3,881	4,021	3,962	3,848	3,964	3,889
3	3,998	3,867	4,002	5,046	4,905	4,951	4,063	3,882	4,023	3,961	3,845	3,960	3,888
4	4,000	3,873	4,001	5,045	4,905	4,950	4,063	3,881	4,019	3,964	3,844	3,962	3,890
5	3,995	3,872	4,000	5,045	4,905	4,950	4,068	3,883	4,021	3,962	3,844	3,960	3,889
6	4,000	3,870	4,000	5,045	4,905	4,947	4,062	3,880	4,020	3,961	3,844	3,962	3,887
7	3,999	3,869	4,003	5,044	4,904	4,947	4,061	3,881	4,021	3,958	3,842	3,959	3,888
8	3,999	3,872	4,001	5,038	4,903	4,948	4,060	3,882	4,018	3,957	3,841	3,964	3,887
9	4,000	3,872	4,001	5,040	4,905	4,948	4,057	3,883	4,019	3,962	3,843	3,960	3,888
10	4,001	3,868	4,001	5,041	4,901	4,945	4,059	3,881	4,020	3,957	3,843	3,963	3,887

vzorek 6 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,992	3,862	4,004	4,999	4,893	5,006	4,084	3,874	4,050	3,964	3,850	3,968	3,890
2	3,994	3,862	4,000	5,001	4,895	5,009	4,082	3,872	4,047	3,963	3,851	3,968	3,891
3	3,992	3,859	4,000	4,999	4,896	5,008	4,081	3,874	4,044	3,962	3,849	3,968	3,890
4	3,991	3,860	4,000	4,994	4,895	5,009	4,082	3,872	4,043	3,962	3,848	3,967	3,889
5	3,992	3,860	3,999	4,997	4,896	5,009	4,081	3,874	4,041	3,960	3,847	3,968	3,891
6	3,990	3,859	3,999	4,996	4,896	5,008	4,083	3,875	4,042	3,962	3,848	3,965	3,888
7	3,992	3,858	3,999	4,997	4,896	5,008	4,087	3,876	4,041	3,960	3,847	3,969	3,893
8	3,993	3,858	3,998	4,997	4,894	5,007	4,081	3,874	4,041	3,959	3,847	3,966	3,891
9	3,991	3,857	3,997	4,996	4,895	5,007	4,080	3,876	4,040	3,961	3,846	3,968	3,891
10	3,992	3,858	3,998	4,996	4,894	5,007	4,080	3,874	4,040	3,960	3,846	3,966	3,893

vzorek 7 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,995	3,862	3,995	4,999	4,906	4,969	4,074	3,874	4,044	3,965	3,845	3,965	3,877
2	3,994	3,859	3,991	4,998	4,909	4,972	4,070	3,872	4,043	3,965	3,847	3,966	3,876
3	3,994	3,860	3,992	4,998	4,909	4,971	4,071	3,873	4,042	3,965	3,845	3,959	3,877
4	3,990	3,858	3,993	4,997	4,909	4,970	4,071	3,870	4,041	3,963	3,849	3,961	3,879
5	3,992	3,862	3,993	4,997	4,908	4,970	4,073	3,869	4,045	3,961	3,846	3,962	3,879
6	3,991	3,865	3,992	4,981	4,908	4,970	4,070	3,868	4,040	3,964	3,844	3,963	3,877
7	3,991	3,860	3,991	4,980	4,908	4,969	4,070	3,868	4,040	3,961	3,846	3,962	3,880
8	3,995	3,858	3,992	4,979	4,905	4,969	4,070	3,869	4,040	3,959	3,843	3,962	3,879
9	3,993	3,859	3,992	4,984	4,903	4,965	4,069	3,870	4,041	3,963	3,844	3,960	3,878
10	3,996	3,858	3,991	4,985	4,903	4,966	4,070	3,868	4,038	3,961	3,846	3,962	3,877



vzorek 8 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,006	3,875	4,022	5,024	4,912	4,918	4,068	3,883	4,053	3,966	3,860	3,966	3,884
2	4,005	3,871	4,020	5,023	4,911	4,920	4,068	3,884	4,053	3,963	3,859	3,965	3,885
3	4,007	3,869	4,019	5,023	4,909	4,919	4,065	3,885	4,054	3,961	3,857	3,964	3,883
4	4,004	3,870	4,020	5,022	4,909	4,920	4,065	3,883	4,054	3,963	3,857	3,960	3,881
5	4,008	3,873	4,019	5,023	4,905	4,919	4,061	3,882	4,055	3,964	3,854	3,961	3,883
6	4,008	3,871	4,019	5,022	4,905	4,919	4,064	3,882	4,052	3,960	3,853	3,961	3,882
7	4,010	3,868	4,018	5,021	4,901	4,918	4,065	3,880	4,054	3,962	3,854	3,961	3,881
8	4,010	3,867	4,017	5,020	4,902	4,919	4,067	3,882	4,049	3,962	3,853	3,963	3,882
9	4,008	3,868	4,020	5,020	4,903	4,916	4,063	3,881	4,050	3,961	3,855	3,965	3,884
10	4,006	3,868	4,019	5,021	4,904	4,917	4,065	3,882	4,054	3,961	3,854	3,962	3,882

vzorek 9 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,996	3,862	4,005	4,965	4,919	5,038	4,046	3,887	4,051	3,963	3,851	3,965	3,893
2	3,996	3,866	4,002	4,970	4,919	5,037	4,045	3,885	4,050	3,962	3,852	3,963	3,894
3	3,994	3,864	4,001	4,970	4,918	5,035	4,044	3,886	4,048	3,964	3,851	3,964	3,893
4	3,996	3,867	4,000	4,970	4,918	5,036	4,041	3,886	4,049	3,959	3,845	3,964	3,893
5	3,997	3,862	4,002	4,970	4,915	5,034	4,045	3,885	4,049	3,959	3,846	3,962	3,892
6	3,999	3,866	4,002	4,969	4,916	5,032	4,043	3,884	4,046	3,959	3,845	3,964	3,893
7	3,998	3,865	4,003	4,969	4,915	5,034	4,041	3,884	4,046	3,958	3,845	3,960	3,896
8	3,998	3,866	4,002	4,968	4,915	5,034	4,041	3,881	4,045	3,957	3,845	3,964	3,895
9	4,001	3,865	4,001	4,963	4,912	5,033	4,040	3,881	4,046	3,958	3,844	3,963	3,891
10	3,998	3,865	4,004	4,964	4,912	5,035	4,043	3,881	4,046	3,958	3,844	3,963	3,894

vzorek 10 - 4%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,005	3,869	4,013	5,023	4,901	5,028	4,046	3,881	4,047	3,964	3,856	3,955	3,884
2	4,006	3,870	4,011	5,026	4,904	5,030	4,045	3,884	4,047	3,966	3,854	3,958	3,883
3	4,001	3,866	4,010	5,027	4,904	5,031	4,045	3,886	4,048	3,962	3,852	3,958	3,884
4	4,004	3,867	4,010	5,026	4,903	5,030	4,041	3,885	4,048	3,963	3,850	3,956	3,882
5	4,004	3,867	4,015	5,023	4,902	5,029	4,040	3,884	4,047	3,962	3,852	3,955	3,883
6	4,009	3,867	4,010	5,024	4,903	5,028	4,045	3,883	4,049	3,962	3,850	3,956	3,884
7	4,006	3,869	4,010	5,022	4,903	5,027	4,041	3,884	4,046	3,964	3,851	3,957	3,885
8	4,007	3,867	4,013	5,024	4,902	5,029	4,041	3,883	4,045	3,962	3,852	3,958	3,885
9	4,002	3,864	4,009	5,023	4,902	5,027	4,041	3,882	4,049	3,962	3,852	3,960	3,884
10	4,000	3,864	4,011	5,020	4,903	5,026	4,046	3,884	4,045	3,960	3,853	3,960	3,885



vzorek 1 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,990	3,849	3,994	4,996	4,900	4,986	4,027	3,863	4,047	3,953	3,835	3,967	3,880
2	3,987	3,854	3,990	4,997	4,903	4,986	4,028	3,860	4,050	3,953	3,835	3,969	3,881
3	3,989	3,850	3,991	4,997	4,903	4,985	4,028	3,866	4,051	3,953	3,836	3,967	3,882
4	3,989	3,856	3,993	4,996	4,902	4,982	4,028	3,866	4,046	3,952	3,835	3,964	3,882
5	3,988	3,850	3,991	4,993	4,903	4,984	4,028	3,861	4,049	3,954	3,835	3,963	3,880
6	3,988	3,854	3,993	4,995	4,902	4,984	4,027	3,859	4,050	3,953	3,835	3,963	3,881
7	3,987	3,848	3,993	4,995	4,897	4,983	4,028	3,859	4,051	3,955	3,835	3,965	3,879
8	3,986	3,851	3,989	4,995	4,897	4,981	4,026	3,864	4,050	3,952	3,836	3,963	3,880
9	3,986	3,847	3,993	4,994	4,898	4,982	4,028	3,859	4,047	3,952	3,833	3,967	3,879
10	3,992	3,846	3,993	4,995	4,896	4,981	4,026	3,858	4,049	3,952	3,834	3,963	3,880

vzorek 2 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,011	3,874	4,002	4,969	4,919	4,945	4,026	3,878	4,039	3,960	3,838	3,958	3,897
2	4,009	3,872	3,999	4,971	4,920	4,943	4,026	3,875	4,044	3,952	3,836	3,960	3,896
3	4,008	3,874	4,001	4,970	4,920	4,945	4,025	3,871	4,039	3,954	3,838	3,961	3,898
4	4,008	3,873	4,001	4,970	4,920	4,940	4,025	3,871	4,039	3,954	3,839	3,957	3,898
5	4,009	3,873	3,998	4,971	4,919	4,941	4,024	3,871	4,043	3,957	3,839	3,958	3,899
6	4,008	3,870	3,999	4,972	4,919	4,942	4,025	3,870	4,040	3,954	3,838	3,955	3,896
7	4,006	3,874	3,997	4,974	4,918	4,941	4,025	3,871	4,043	3,956	3,838	3,956	3,896
8	4,009	3,873	4,000	4,974	4,918	4,939	4,026	3,871	4,044	3,957	3,839	3,956	3,898
9	4,007	3,874	3,990	4,973	4,919	4,940	4,025	3,871	4,043	3,957	3,839	3,959	3,897
10	4,006	3,874	3,998	4,972	4,918	4,945	4,026	3,874	4,045	3,959	3,838	3,957	3,898

vzorek 3 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,010	3,859	3,998	4,964	4,913	5,044	4,105	3,875	4,041	3,956	3,838	3,967	3,884
2	4,007	3,860	3,994	4,966	4,915	5,041	4,102	3,878	4,040	3,957	3,841	3,965	3,883
3	4,008	3,861	3,996	4,965	4,915	5,042	4,102	3,874	4,039	3,954	3,838	3,961	3,882
4	4,007	3,857	3,994	4,964	4,914	5,041	4,100	3,875	4,038	3,953	3,838	3,961	3,883
5	4,007	3,856	3,995	4,963	4,912	5,043	4,102	3,874	4,035	3,953	3,839	3,962	3,883
6	4,009	3,856	3,994	4,962	4,913	5,045	4,102	3,873	4,039	3,953	3,838	3,962	3,881
7	4,006	3,862	3,993	4,963	4,912	5,044	4,102	3,875	4,037	3,955	3,840	3,963	3,883
8	4,005	3,861	3,995	4,964	4,911	5,044	4,099	3,874	4,038	3,954	3,840	3,962	3,884
9	4,006	3,859	3,997	4,961	4,912	5,040	4,100	3,875	4,039	3,953	3,840	3,960	3,885
10	4,005	3,858	3,997	4,963	4,912	5,041	4,098	3,872	4,038	3,952	3,838	3,960	3,884



vzorek 4 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,992	3,869	4,003	5,015	4,910	5,030	4,071	3,879	4,034	3,957	3,842	3,967	3,890
2	3,991	3,867	4,000	5,014	4,912	5,030	4,070	3,879	4,039	3,958	3,839	3,965	3,892
3	3,991	3,868	4,000	5,023	4,911	5,030	4,078	3,882	4,040	3,956	3,837	3,962	3,891
4	3,992	3,863	4,002	5,022	4,912	5,029	4,077	3,884	4,043	3,955	3,838	3,961	3,889
5	3,990	3,860	3,999	5,023	4,911	5,029	4,076	3,882	4,042	3,956	3,837	3,959	3,888
6	3,988	3,867	4,000	5,019	4,910	5,028	4,074	3,879	4,039	3,956	3,839	3,962	3,889
7	3,990	3,868	3,999	5,020	4,911	5,028	4,074	3,880	4,040	3,956	3,837	3,962	3,890
8	3,990	3,864	3,997	5,018	4,911	5,027	4,074	3,882	4,039	3,954	3,836	3,961	3,889
9	3,988	3,865	3,999	5,017	4,912	5,027	4,071	3,883	4,041	3,954	3,837	3,961	3,893
10	3,988	3,861	3,998	5,016	4,912	5,026	4,075	3,879	4,039	3,954	3,838	3,959	3,893

vzorek 5 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,010	3,876	4,010	4,983	4,939	5,011	4,157	3,892	4,045	3,954	3,842	3,967	3,902
2	4,012	3,877	4,009	4,988	4,937	5,011	4,153	3,900	4,047	3,953	3,838	3,961	3,902
3	4,012	3,876	4,008	4,987	4,940	5,013	4,152	3,896	4,044	3,957	3,839	3,967	3,900
4	4,010	3,875	4,003	4,985	4,941	5,013	4,150	3,893	4,043	3,959	3,841	3,967	3,899
5	4,010	3,875	4,003	4,986	4,941	5,012	4,150	3,891	4,042	3,955	3,839	3,964	3,901
6	4,006	3,872	4,004	4,987	4,940	5,012	4,152	3,889	4,043	3,954	3,839	3,962	3,902
7	4,010	3,871	4,006	4,985	4,936	5,011	4,151	3,880	4,041	3,955	3,840	3,962	3,901
8	4,010	3,872	4,007	4,983	4,939	5,011	4,152	3,889	4,040	3,955	3,837	3,962	3,899
9	4,007	3,873	4,004	4,980	4,939	5,010	4,152	3,892	4,041	3,954	3,837	3,960	3,900
10	4,009	3,875	4,004	4,982	4,938	5,010	4,150	3,889	4,040	3,954	3,840	3,964	3,908

vzorek 6 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,000	3,844	3,994	4,983	4,895	5,013	4,024	3,860	4,028	3,955	3,838	3,961	3,896
2	4,001	3,844	3,991	4,987	4,899	5,012	4,022	3,858	4,025	3,953	3,838	3,963	3,898
3	4,003	3,842	3,992	4,987	4,899	5,012	4,024	3,858	4,024	3,954	3,838	3,964	3,897
4	3,998	3,840	3,991	4,986	4,897	5,011	4,023	3,857	4,025	3,955	3,839	3,966	3,895
5	3,999	3,840	3,991	4,987	4,898	5,010	4,019	3,856	4,026	3,955	3,840	3,965	3,897
6	3,999	3,841	3,989	4,986	4,898	5,011	4,023	3,855	4,024	3,954	3,839	3,965	3,897
7	4,001	3,841	3,987	4,985	4,887	5,012	4,019	3,855	4,025	3,956	3,837	3,965	3,896
8	4,001	3,842	3,987	4,986	4,887	5,011	4,021	3,856	4,022	3,955	3,839	3,965	3,894
9	3,999	3,840	3,991	4,985	4,888	5,010	4,021	3,857	4,023	3,957	3,838	3,965	3,896
10	4,000	3,841	3,990	4,985	4,887	5,010	4,022	3,856	4,024	3,958	3,840	3,964	3,895



vzorek 7 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,008	3,879	4,006	4,974	4,897	5,028	4,074	3,874	4,037	3,954	3,841	3,962	3,885
2	4,008	3,872	4,003	4,978	4,898	5,033	4,073	3,875	4,034	3,955	3,838	3,963	3,884
3	4,006	3,874	4,001	4,978	4,898	5,033	4,071	3,875	4,034	3,955	3,839	3,965	3,882
4	4,006	3,873	4,004	4,978	4,899	5,032	4,073	3,877	4,034	3,954	3,839	3,961	3,884
5	4,011	3,874	4,001	4,977	4,897	5,031	4,072	3,876	4,035	3,955	3,839	3,961	3,884
6	4,005	3,870	4,002	4,976	4,897	5,030	4,071	3,873	4,033	3,954	3,839	3,962	3,883
7	4,007	3,874	4,001	4,976	4,898	5,029	4,069	3,875	4,035	3,954	3,837	3,961	3,883
8	4,008	3,873	3,999	4,974	4,897	5,030	4,068	3,878	4,033	3,953	3,838	3,960	3,884
9	4,009	3,872	4,000	4,974	4,897	5,031	4,072	3,874	4,036	3,956	3,837	3,965	3,883
10	4,008	3,872	3,999	4,973	4,894	5,031	4,070	3,873	4,036	3,955	3,838	3,961	3,883

vzorek 8 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	4,034	3,884	4,040	5,026	4,939	5,047	4,072	3,899	4,078	3,957	3,838	3,960	3,890
2	4,031	3,878	4,038	5,031	4,939	5,044	4,069	3,899	4,073	3,958	3,839	3,958	3,889
3	4,033	3,879	4,038	5,030	4,938	5,045	4,067	3,900	4,072	3,956	3,837	3,958	3,890
4	4,032	3,880	4,037	5,031	4,938	5,044	4,065	3,897	4,072	3,958	3,837	3,958	3,888
5	4,035	3,878	4,040	5,030	4,939	5,043	4,063	3,898	4,071	3,960	3,835	3,955	3,889
6	4,034	3,880	4,038	5,030	4,938	5,043	4,063	3,895	4,070	3,958	3,835	3,955	3,891
7	4,032	3,878	4,040	5,029	4,937	5,044	4,062	3,897	4,070	3,957	3,836	3,958	3,888
8	4,031	3,878	4,038	5,026	4,938	5,043	4,061	3,896	4,072	3,954	3,836	3,957	3,891
9	4,034	3,878	4,038	5,027	4,937	5,042	4,061	3,898	4,073	3,958	3,834	3,956	3,892
10	4,031	3,875	4,037	5,027	4,937	5,042	4,062	3,895	4,069	3,951	3,836	3,955	3,888

vzorek 9 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,991	3,862	3,995	5,010	4,904	4,971	4,112	3,879	4,044	3,953	3,838	3,960	3,885
2	3,989	3,858	3,994	5,006	4,905	4,974	4,114	3,881	4,043	3,954	3,839	3,962	3,888
3	3,992	3,858	3,994	5,011	4,906	4,974	4,112	3,884	4,042	3,953	3,839	3,961	3,887
4	3,994	3,857	3,999	5,012	4,907	4,973	4,111	3,882	4,043	3,952	3,837	3,960	3,885
5	3,993	3,856	4,000	5,013	4,906	4,974	4,110	3,879	4,043	3,953	3,838	3,961	3,887
6	3,992	3,856	3,999	5,011	4,907	4,974	4,110	3,880	4,041	3,952	3,839	3,959	3,886
7	3,992	3,854	3,996	5,011	4,906	4,973	4,105	3,875	4,041	3,953	3,839	3,961	3,886
8	3,990	3,854	3,998	5,009	4,906	4,973	4,103	3,875	4,040	3,955	3,839	3,962	3,887
9	3,993	3,857	3,994	5,010	4,907	4,974	4,107	3,877	4,039	3,955	3,840	3,961	3,885
10	3,993	3,856	3,999	5,010	4,905	4,974	4,107	3,879	4,041	3,956	3,839	3,960	3,887

vzorek 10 - 6%													
tloušťka číslo měření	t ₁ [mm]	t ₂ [mm]	t ₃ [mm]	t ₄ [mm]	t ₅ [mm]	t ₆ [mm]	t ₇ [mm]	t ₈ [mm]	t ₉ [mm]	t ₁₀ [mm]	t ₁₁ [mm]	t ₁₂ [mm]	t ₁₃ [mm]
1	3,988	3,856	4,001	5,001	4,895	4,947	4,076	3,875	4,042	3,955	3,846	3,961	3,892
2	3,985	3,860	3,999	5,006	4,894	4,950	4,072	3,876	4,041	3,955	3,844	3,959	3,893
3	3,987	3,858	3,997	5,005	4,895	4,949	4,072	3,873	4,038	3,952	3,846	3,961	3,892
4	3,988	3,857	3,996	5,005	4,893	4,950	4,070	3,874	4,039	3,952	3,844	3,961	3,892
5	3,988	3,856	3,997	5,004	4,890	4,949	4,071	3,876	4,037	3,954	3,845	3,960	3,895
6	3,987	3,855	3,996	5,004	4,890	4,949	4,070	3,872	4,039	3,953	3,845	3,961	3,893
7	3,985	3,859	3,998	5,001	4,899	4,950	4,070	3,872	4,039	3,951	3,845	3,961	3,894
8	3,984	3,857	3,996	5,001	4,899	4,949	4,069	3,872	4,037	3,951	3,846	3,960	3,895
9	3,985	3,861	3,998	5,000	4,900	4,948	4,070	3,871	4,040	3,953	3,844	3,960	3,892
10	3,984	3,856	3,997	5,000	4,897	4,947	4,069	3,871	4,038	3,951	3,845	3,959	3,892

Příloha 5 - Naměřená data pro série 0% při $d_{wft}' = 96,540$ mm

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μ m; $d_{wft}' = 96,540$ mm; 0%

vzorek	F _d [N]	d _c [mm]	E _w [J]	P _m [W]	d _w [mm]	t _w [s]	v _w [mm/s]	d ₁ [mm]	d _{wf} [mm]	d ₁ [mm]	d _{1f} [mm]
1	215,8	8,15	63,8	552	0,557	0,211	2,640	95,983	96,540	0,195	96,735
2	177,3	8,15	63,6	553	0,519	0,209	2,483	96,024	96,543	0,199	96,742
3	164,4	8,16	64,6	572	0,515	0,209	2,464	96,026	96,541	0,198	96,739
4	159,4	8,16	68,3	567	0,518	0,217	2,387	96,024	96,542	0,197	96,739
5	177,0	8,16	71,1	578	0,519	0,220	2,359	96,023	96,542	0,190	96,732
6	162,4	8,16	68,2	562	0,539	0,216	2,495	96,001	96,540	0,198	96,738
7	223,2	8,15	62,7	561	0,542	0,207	2,618	96,001	96,543	0,204	96,747
8	169,0	8,16	64,7	566	0,513	0,207	2,478	96,032	96,545	0,198	96,743
9	184,0	8,14	63,5	581	0,526	0,207	2,541	96,014	96,540	0,206	96,746
10	173,8	8,15	67,5	559	0,531	0,215	2,470	96,011	96,542	0,196	96,738
11	171,8	8,13	65,4	563	0,503	0,209	2,407	96,037	96,540	0,208	96,748
12	194,3	8,15	60,7	557	0,515	0,200	2,575	96,025	96,540	0,205	96,745
13	188,3	8,17	67,3	588	0,532	0,210	2,533	96,008	96,540	0,196	96,736
14	196,0	8,15	62,2	578	0,516	0,200	2,580	96,026	96,542	0,206	96,748
15	168,0	8,16	62,8	578	0,511	0,203	2,517	96,029	96,540	0,205	96,745
16	161,4	8,16	62,8	551	0,523	0,204	2,564	96,020	96,543	0,200	96,743
17	194,0	8,15	70,2	585	0,516	0,213	2,423	96,026	96,542	0,196	96,738
18	199,3	8,13	61,8	572	0,510	0,199	2,563	96,033	96,543	0,211	96,754
19	181,8	8,14	59,5	576	0,505	0,195	2,590	96,035	96,540	0,211	96,751
20	185,0	8,16	60,1	566	0,531	0,198	2,682	96,010	96,541	0,203	96,744
21	216,0	8,13	62,5	591	0,516	0,197	2,619	96,030	96,546	0,205	96,751



$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}}' = 96,540$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_n [mm]	d_{nf} [mm]
1	223,8	8,18	74,5	474	0,494	0,270	1,830	96,052	96,546	0,199	96,745
2	197,6	8,13	84,3	439	0,564	0,302	1,868	95,978	96,542	0,208	96,750
3	200,3	8,16	68,6	463	0,493	0,249	1,980	96,048	96,541	0,192	96,733
4	241,3	8,15	83,0	460	0,536	0,297	1,805	96,005	96,541	0,203	96,744
5	189,0	8,16	85,2	484	0,526	0,286	1,839	96,020	96,546	0,195	96,741
6	247,3	8,15	80,4	474	0,520	0,277	1,877	96,020	96,540	0,198	96,738
7	234,8	8,15	78,8	474	0,510	0,278	1,835	96,031	96,541	0,201	96,742
8	192,4	8,14	95,0	340	0,564	0,420	1,343	95,976	96,540	0,193	96,733
9	222,0	8,17	97,9	371	0,578	0,434	1,332	95,968	96,546	0,163	96,709
10	199,0	8,17	100,6	380	0,566	0,434	1,304	95,975	96,541	0,171	96,712
11	192,4	8,16	93,7	378	0,539	0,406	1,328	96,003	96,542	0,178	96,720
12	204,8	8,14	98,1	406	0,537	0,413	1,300	96,004	96,541	0,187	96,728
13	193,0	8,14	89,1	368	0,542	0,375	1,445	96,000	96,542	0,196	96,738
14	206,0	8,12	99,2	379	0,576	0,411	1,401	95,966	96,542	0,199	96,741
15	203,0	8,15	83,2	403	0,517	0,352	1,469	96,024	96,541	0,183	96,724
16	200,3	8,13	81,2	421	0,521	0,348	1,497	96,020	96,541	0,195	96,736
17	221,0	8,15	93,0	374	0,541	0,386	1,402	95,999	96,540	0,195	96,735
18	194,6	8,16	93,4	407	0,548	0,382	1,435	95,993	96,541	0,183	96,724
19	200,0	8,15	102,6	395	0,586	0,411	1,426	95,957	96,543	0,185	96,728
20	190,6	8,15	85,8	392	0,510	0,353	1,445	96,033	96,543	0,193	96,736
21	212,8	8,16	85,8	412	0,513	0,356	1,441	96,029	96,542	0,180	96,722

$K = 6$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wft}}' = 96,540$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_n [mm]	d_{nf} [mm]
1	230,0	8,18	115,7	210	0,537	0,760	0,707	96,003	96,540	0,173	96,713
2	267,8	8,19	92,2	218	0,537	0,692	0,776	96,004	96,541	0,158	96,699
3	91,7	8,16	172,7	228	0,511	1,068	0,478	96,029	96,540	0,200	96,740
4	202,0	8,16	118,2	270	0,514	0,763	0,674	96,027	96,541	0,185	96,726
5	209,4	8,17	144,6	201	0,521	0,924	0,564	96,019	96,540	0,177	96,717
6	220,3	8,16	127,2	240	0,549	0,836	0,657	95,992	96,541	0,178	96,719
7	120,0	8,12	159,6	231	0,528	0,985	0,536	96,012	96,540	0,206	96,746
8	149,0	8,17	111,8	235	0,550	0,739	0,744	95,993	96,543	0,170	96,713
9	162,4	8,15	110,8	207	0,512	0,671	0,763	96,031	96,543	0,195	96,738
10	151,0	8,17	130,4	229	0,531	0,827	0,642	96,009	96,540	0,172	96,712
11	186,4	8,17	115,1	209	0,554	0,777	0,713	95,987	96,541	0,178	96,719
12	139,4	8,16	107,2	226	0,522	0,675	0,773	96,018	96,540	0,186	96,726
13	214,4	8,18	159,3	240	0,572	0,981	0,583	95,968	96,540	0,183	96,723
14	192,0	8,17	108,1	211	0,542	0,682	0,795	95,998	96,540	0,172	96,712
15	186,0	8,17	87,7	247	0,518	0,588	0,881	96,025	96,543	0,174	96,717
16	189,0	8,18	119,5	243	0,562	0,757	0,742	95,978	96,540	0,175	96,715
17	213,4	8,15	103,9	249	0,580	0,669	0,867	95,963	96,543	0,176	96,719
18	220,3	8,16	81,6	243	0,518	0,547	0,947	96,022	96,540	0,189	96,729
19	99,0	8,17	134,3	231	0,504	0,820	0,615	96,036	96,540	0,194	96,734
20	262,8	8,14	101,5	231	0,515	0,620	0,831	96,025	96,540	0,200	96,740
21	152,0	8,16	99,3	232	0,498	0,603	0,826	96,043	96,541	0,188	96,729

Příloha 6 - Naměřená data - vliv změny stupně brzdění K

$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	215,0	8,12	103,9	342	0,633	0,497	1,274	95,982	96,615	0,167	96,782
2	203,3	8,12	83,7	337	0,637	0,398	1,601	95,979	96,616	0,160	96,776
3	213,3	8,11	96,0	368	0,635	0,444	1,430	95,983	96,618	0,162	96,780
4	276,3	8,10	110,0	358	0,631	0,494	1,277	95,984	96,615	0,177	96,792
5	302,0	8,10	105,3	369	0,633	0,461	1,373	95,982	96,615	0,176	96,791
6	295,7	8,09	115,9	361	0,637	0,510	1,249	95,978	96,615	0,182	96,797
7	289,7	8,10	113,0	356	0,638	0,497	1,284	95,977	96,615	0,179	96,794
8	350,8	8,09	123,3	333	0,646	0,543	1,190	95,969	96,615	0,188	96,803
9	278,0	8,10	108,1	375	0,629	0,471	1,335	95,986	96,615	0,179	96,794
10	239,3	8,12	105,4	381	0,662	0,447	1,481	95,953	96,615	0,172	96,787
11	266,0	8,10	112,8	397	0,645	0,466	1,384	95,970	96,615	0,183	96,798
12	309,0	8,09	140,9	383	0,622	0,564	1,103	95,993	96,615	0,192	96,807
13	307,3	8,09	137,6	367	0,640	0,558	1,147	95,975	96,615	0,192	96,807
14	348,8	8,08	140,1	368	0,647	0,568	1,139	95,968	96,615	0,193	96,808
15	284,0	8,08	86,1	339	0,646	0,391	1,652	95,970	96,616	0,184	96,800
16	273,3	8,10	113,1	383	0,634	0,465	1,363	95,981	96,615	0,180	96,795
17	203,7	8,12	73,3	383	0,620	0,325	1,908	95,995	96,615	0,166	96,781
18	215,7	8,11	92,6	366	0,634	0,379	1,673	95,987	96,621	0,164	96,785
19	300,3	8,10	121,0	375	0,621	0,480	1,294	95,994	96,615	0,186	96,801
20	226,0	8,11	99,2	366	0,622	0,399	1,559	95,994	96,616	0,168	96,784
21	301,3	8,10	114,9	404	0,626	0,462	1,355	95,989	96,615	0,182	96,797

$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	135,0	8,07	155,2	319	0,617	0,662	0,932	95,999	96,616	0,206	96,822
2	206,0	8,09	153,3	302	0,621	0,650	0,955	95,994	96,615	0,196	96,811
3	150,0	8,08	151,1	305	0,631	0,646	0,977	95,984	96,615	0,191	96,806
4	180,0	8,10	105,9	334	0,592	0,489	1,211	96,024	96,616	0,168	96,784
5	149,3	8,11	108,8	305	0,663	0,482	1,376	95,952	96,615	0,164	96,779
6	94,3	8,08	145,1	294	0,623	0,618	1,008	95,992	96,615	0,193	96,808
7	163,7	8,08	151,8	308	0,622	0,631	0,986	95,993	96,615	0,199	96,814
8	182,7	8,13	102,7	337	0,614	0,452	1,358	96,001	96,615	0,166	96,781
9	193,0	8,10	106,6	342	0,620	0,464	1,336	95,995	96,615	0,183	96,798
10	178,7	8,09	138,8	315	0,643	0,576	1,116	95,972	96,615	0,193	96,808
11	166,7	8,10	123,0	308	0,612	0,524	1,168	96,003	96,615	0,176	96,791
12	109,7	8,10	135,7	375	0,573	0,491	1,167	96,043	96,616	0,182	96,798
13	195,0	8,09	124,4	391	0,603	0,457	1,319	96,012	96,615	0,186	96,801
14	159,7	8,11	104,1	375	0,579	0,401	1,444	96,036	96,615	0,180	96,795
15	155,3	8,11	113,9	371	0,623	0,427	1,459	95,992	96,615	0,181	96,796
16	192,3	8,11	106,4	376	0,584	0,399	1,464	96,031	96,615	0,182	96,797
17	168,3	8,09	110,8	370	0,606	0,405	1,496	96,010	96,616	0,195	96,811
18	159,7	8,09	113,1	370	0,598	0,417	1,434	96,017	96,615	0,186	96,801
19	100,0	8,07	125,7	396	0,596	0,439	1,358	96,020	96,616	0,204	96,820
20	116,0	8,11	104,8	380	0,619	0,390	1,587	95,996	96,615	0,179	96,794
21	112,3	8,08	115,4	399	0,560	0,395	1,418	96,056	96,616	0,197	96,813



$K=3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_h [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	138,0	8,10	122,5	299	0,599	0,577	1,038	96,016	96,615	0,182	96,797
2	83,3	8,06	180,0	296	0,600	0,780	0,769	96,015	96,615	0,201	96,816
3	94,0	8,07	159,3	294	0,594	0,701	0,847	96,021	96,615	0,195	96,810
4	188,4	8,06	102,9	287	0,648	0,501	1,293	95,967	96,615	0,180	96,795
5	162,0	8,11	99,4	293	0,621	0,484	1,283	95,994	96,615	0,177	96,792
6	180,6	8,10	112,3	300	0,600	0,522	1,149	96,015	96,615	0,178	96,793
7	173,6	8,09	138,0	310	0,595	0,606	0,982	96,020	96,615	0,182	96,797
8	141,6	8,10	119,8	297	0,606	0,556	1,090	96,009	96,615	0,177	96,792
9	131,0	8,12	124,8	294	0,607	0,547	1,110	96,008	96,615	0,176	96,791
10	152,6	8,09	126,2	306	0,605	0,543	1,114	96,010	96,615	0,181	96,796
11	178,6	8,11	92,3	306	0,609	0,433	1,406	96,006	96,615	0,179	96,794
12	166,0	8,08	71,1	369	0,596	0,287	2,077	96,020	96,616	0,211	96,827
13	179,6	8,09	177,6	312	0,617	0,868	0,711	95,998	96,615	0,183	96,798
14	183,0	8,05	202,6	321	0,616	0,933	0,660	95,999	96,615	0,208	96,823
15	138,0	8,07	79,8	311	0,627	0,400	1,568	95,988	96,615	0,189	96,804
16	146,4	8,06	74,6	316	0,597	0,373	1,601	96,019	96,616	0,204	96,820
17	146,0	8,09	157,1	319	0,603	0,742	0,813	96,012	96,615	0,180	96,795
18	147,6	8,10	112,1	310	0,596	0,544	1,096	96,019	96,615	0,177	96,792
19	160,4	8,09	143,7	312	0,610	0,677	0,901	96,005	96,615	0,185	96,800
20	168,4	8,10	127,1	311	0,610	0,597	1,022	96,005	96,615	0,184	96,799
21	187,0	8,11	143,9	315	0,609	0,637	0,956	96,006	96,615	0,182	96,797

$K=3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_h [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	152,6	8,11	114,8	327	0,601	0,530	1,134	96,014	96,615	0,188	96,803
2	151,4	8,11	79,6	291	0,596	0,394	1,513	96,019	96,615	0,188	96,803
3	143,0	8,10	86,4	292	0,588	0,408	1,441	96,027	96,615	0,189	96,804
4	145,1	8,10	87,0	313	0,590	0,417	1,415	96,025	96,615	0,193	96,808
5	126,0	8,10	85,8	289	0,600	0,407	1,474	96,015	96,615	0,189	96,804
6	105,0	8,11	69,8	277	0,584	0,352	1,659	96,031	96,615	0,194	96,809
7	109,6	8,10	93,5	331	0,587	0,416	1,411	96,028	96,615	0,188	96,803
8	131,7	8,12	80,5	301	0,594	0,380	1,563	96,021	96,615	0,190	96,805
9	152,6	8,11	104,8	342	0,584	0,456	1,281	96,031	96,615	0,181	96,796
10	121,4	8,09	94,4	362	0,591	0,422	1,400	96,025	96,616	0,191	96,807
11	103,4	8,11	100,2	325	0,598	0,437	1,368	96,017	96,615	0,185	96,800
12	105,6	8,12	82,2	308	0,584	0,381	1,533	96,031	96,615	0,191	96,806
13	167,6	8,09	97,5	310	0,607	0,456	1,331	96,008	96,615	0,186	96,801
14	159,0	8,09	100,0	338	0,601	0,462	1,301	96,014	96,615	0,188	96,803
15	93,7	8,09	78,0	331	0,590	0,358	1,648	96,026	96,616	0,185	96,801
16	110,0	8,10	78,4	346	0,601	0,366	1,642	96,014	96,615	0,184	96,799
17	125,0	8,09	97,2	327	0,605	0,436	1,388	96,010	96,615	0,185	96,800
18	88,2	8,07	160,0	339	0,594	0,649	0,915	96,021	96,615	0,200	96,815
19	99,7	8,09	83,7	313	0,588	0,389	1,512	96,027	96,615	0,192	96,807
20	91,7	8,10	124,9	339	0,605	0,502	1,205	96,010	96,615	0,199	96,814
21	86,7	8,08	126,6	330	0,585	0,517	1,132	96,030	96,615	0,199	96,814



$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	418,0	8,07	163,6	269	0,635	1,023	0,621	95,980	96,615	0,198	96,813
2	396,4	8,06	156,9	293	0,596	0,972	0,613	96,019	96,615	0,197	96,812
3	312,4	8,08	148,5	274	0,635	0,941	0,675	95,980	96,615	0,182	96,797
4	295,6	8,09	144,6	280	0,623	0,899	0,693	95,992	96,615	0,176	96,791
5	321,2	8,09	144,5	272	0,632	0,901	0,701	95,984	96,616	0,184	96,800
6	295,6	8,11	146,9	275	0,623	0,936	0,666	95,992	96,615	0,166	96,781
7	386,4	8,11	177,8	256	0,735	1,152	0,638	95,887	96,622	0,154	96,776
8	307,2	8,10	134,4	280	0,630	0,850	0,741	95,985	96,615	0,179	96,794
9	292,4	8,11	141,1	274	0,623	0,886	0,703	95,992	96,615	0,171	96,786
10	388,0	8,08	132,9	289	0,616	0,814	0,757	96,002	96,618	0,193	96,811
11	336,4	8,09	137,4	293	0,628	0,840	0,748	95,988	96,616	0,192	96,808
12	312,0	8,10	169,6	351	0,589	0,781	0,754	96,026	96,615	0,198	96,813
13	228,0	8,11	122,6	328	0,604	0,572	1,056	96,015	96,619	0,177	96,796
14	218,3	8,11	152,3	338	0,606	0,718	0,844	96,009	96,615	0,192	96,807
15	227,0	8,11	144,2	353	0,597	0,686	0,870	96,018	96,615	0,190	96,805
16	378,4	8,11	165,8	361	0,607	0,769	0,789	96,008	96,615	0,202	96,817
17	303,2	8,11	151,0	337	0,608	0,717	0,848	96,007	96,615	0,186	96,801
18	344,0	8,09	201,2	271	0,657	1,173	0,560	95,958	96,615	0,180	96,795
19	344,4	8,11	194,8	279	0,639	1,147	0,557	95,976	96,615	0,166	96,781
20	363,2	8,09	190,0	309	0,655	1,154	0,568	95,960	96,615	0,170	96,785
21	362,8	8,10	178,2	283	0,643	1,048	0,614	95,972	96,615	0,166	96,781

$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	181,6	8,08	167,2	268	0,608	0,969	0,627	96,008	96,616	0,202	96,818
2	186,6	8,05	181,8	267	0,631	1,058	0,596	95,984	96,615	0,220	96,835
3	223,8	8,06	122,1	273	0,632	0,737	0,858	95,983	96,615	0,208	96,823
4	192,0	8,07	172,5	263	0,627	0,992	0,632	95,991	96,618	0,208	96,826
5	187,0	8,06	158,2	265	0,633	0,936	0,676	95,982	96,615	0,215	96,830
6	210,8	8,07	184,0	272	0,596	0,992	0,601	96,019	96,615	0,195	96,810
7	188,4	8,08	171,0	271	0,617	0,958	0,644	95,999	96,616	0,209	96,825
8	192,0	8,06	170,0	275	0,573	0,934	0,613	96,042	96,615	0,221	96,836
9	179,6	8,08	153,5	273	0,600	0,850	0,706	96,016	96,616	0,195	96,811
10	193,6	8,05	203,1	278	0,602	1,068	0,564	96,013	96,615	0,218	96,833
11	219,8	8,06	149,6	277	0,589	0,813	0,724	96,026	96,615	0,205	96,820
12	225,0	8,06	154,1	284	0,604	0,884	0,683	96,011	96,615	0,203	96,818
13	252,6	8,06	151,2	272	0,645	0,874	0,738	95,970	96,615	0,211	96,826
14	231,8	8,05	166,0	283	0,613	0,923	0,664	96,002	96,615	0,204	96,819
15	267,2	8,05	158,0	287	0,590	0,869	0,679	96,025	96,615	0,214	96,829
16	233,0	8,05	134,1	287	0,595	0,762	0,781	96,020	96,615	0,208	96,823
17	191,6	8,04	221,6	276	0,638	1,199	0,532	95,979	96,617	0,218	96,835
18	193,4	8,05	183,2	285	0,600	0,969	0,619	96,018	96,618	0,215	96,833
19	199,8	8,05	203,7	286	0,648	1,087	0,596	95,967	96,615	0,211	96,826
20	191,4	8,07	183,9	287	0,580	0,959	0,605	96,036	96,616	0,207	96,823
21	266,0	8,06	137,2	291	0,594	0,757	0,785	96,021	96,615	0,202	96,817

$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	151,4	8,08	146,8	283	0,596	0,772	0,772	96,022	96,618	0,207	96,825
2	171,4	8,06	156,9	271	0,594	0,815	0,729	96,024	96,618	0,216	96,834
3	190,0	8,06	101,0	269	0,629	0,584	1,077	95,986	96,615	0,225	96,840
4	102,4	8,07	204,6	271	0,587	1,008	0,582	96,028	96,615	0,214	96,829
5	127,1	8,06	210,0	277	0,611	1,041	0,587	96,004	96,615	0,222	96,837
6	82,0	8,07	199,5	273	0,574	0,956	0,600	96,041	96,615	0,213	96,828
7	151,6	8,09	183,6	281	0,583	0,909	0,641	96,032	96,615	0,203	96,818
8	164,4	8,08	191,5	284	0,583	0,917	0,636	96,032	96,615	0,212	96,827
9	133,1	8,09	188,6	280	0,581	0,921	0,631	96,034	96,615	0,202	96,817
10	132,3	8,08	175,0	279	0,573	0,858	0,668	96,042	96,615	0,205	96,820
11	164,4	8,07	174,3	278	0,573	0,851	0,673	96,042	96,615	0,213	96,828
12	169,6	8,06	110,8	299	0,596	0,592	1,007	96,019	96,615	0,215	96,830
13	198,4	8,06	113,0	294	0,633	0,629	1,006	95,982	96,615	0,221	96,836
14	189,0	8,06	121,2	333	0,592	0,617	0,959	96,023	96,615	0,220	96,835
15	186,0	8,06	111,3	295	0,588	0,593	0,992	96,027	96,615	0,213	96,828
16	97,0	8,07	228,6	289	0,592	1,060	0,558	96,023	96,615	0,209	96,824
17	187,6	8,07	103,1	289	0,591	0,560	1,055	96,024	96,615	0,211	96,826
18	204,0	8,05	108,8	310	0,600	0,570	1,053	96,019	96,619	0,224	96,843
19	155,4	8,08	106,3	296	0,589	0,552	1,067	96,026	96,615	0,200	96,815
20	151,4	8,09	91,0	321	0,586	0,490	1,196	96,029	96,615	0,187	96,802
21	114,0	8,10	192,4	290	0,572	0,928	0,616	96,043	96,615	0,185	96,800

$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	98,3	8,09	79,4	272	0,571	0,443	1,289	96,045	96,616	0,197	96,813
2	81,0	8,11	101,0	278	0,592	0,566	1,046	96,023	96,615	0,183	96,798
3	179,6	8,07	142,5	281	0,605	0,963	0,628	96,010	96,615	0,201	96,816
4	164,6	8,06	140,6	264	0,611	0,946	0,646	96,005	96,616	0,196	96,812
5	190,0	8,06	143,3	291	0,605	0,945	0,640	96,010	96,615	0,207	96,822
6	164,6	8,06	141,2	284	0,617	0,929	0,664	95,998	96,615	0,204	96,819
7	209,3	8,05	163,0	226	0,638	1,034	0,617	95,983	96,621	0,213	96,834
8	121,4	8,07	139,6	270	0,605	0,913	0,663	96,011	96,616	0,196	96,812
9	203,8	8,07	149,8	247	0,624	0,968	0,645	95,992	96,616	0,206	96,822
10	176,0	8,06	135,7	252	0,580	0,867	0,669	96,035	96,615	0,211	96,826
11	161,6	8,06	142,0	222	0,611	0,906	0,674	96,006	96,617	0,214	96,831
12	179,4	8,06	92,6	305	0,572	0,478	1,197	96,043	96,615	0,230	96,845
13	203,8	8,07	157,3	293	0,563	0,773	0,728	96,052	96,615	0,201	96,816
14	143,4	8,08	147,4	279	0,564	0,734	0,768	96,051	96,615	0,200	96,815
15	119,4	8,09	84,7	309	0,568	0,426	1,333	96,047	96,615	0,219	96,834
16	111,0	8,06	156,2	284	0,601	0,933	0,644	96,014	96,615	0,213	96,828
17	190,6	8,05	174,3	289	0,603	1,059	0,569	96,012	96,615	0,203	96,818
18	221,0	8,06	157,1	270	0,599	0,959	0,625	96,016	96,615	0,202	96,817
19	173,0	8,07	174,7	287	0,588	1,030	0,571	96,027	96,615	0,209	96,824
20	165,6	8,07	172,9	315	0,600	1,018	0,589	96,015	96,615	0,204	96,819
21	186,4	8,07	157,2	291	0,587	0,920	0,638	96,029	96,616	0,210	96,826

$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	425,5	8,07	232,4	266	0,626	1,512	0,414	95,991	96,617	0,200	96,817
2	507,0	8,06	226,4	265	0,626	1,531	0,409	95,989	96,615	0,212	96,827
3	516,0	8,07	216,9	249	0,625	1,433	0,436	95,990	96,615	0,203	96,818
4	419,0	8,07	247,3	261	0,636	1,611	0,407	95,959	96,615	0,194	96,809
5	447,5	8,08	203,8	270	0,634	1,369	0,463	95,981	96,615	0,188	96,803
6	436,5	8,10	250,9	274	0,635	1,674	0,379	95,980	96,615	0,175	96,790
7	493,5	8,06	227,1	265	0,628	1,456	0,431	95,987	96,615	0,209	96,824
8	360,0	8,10	239,8	256	0,618	1,603	0,386	95,997	96,615	0,175	96,790
9	411,0	8,08	231,5	284	0,638	1,487	0,429	95,977	96,615	0,185	96,800
10	428,0	8,08	217,2	265	0,622	1,381	0,450	95,993	96,615	0,203	96,818
11	370,4	8,09	213,0	262	0,599	1,373	0,436	96,016	96,615	0,182	96,797
12	351,6	8,08	328,4	272	0,641	2,047	0,313	95,974	96,615	0,183	96,798
13	454,0	8,07	382,4	279	0,635	2,296	0,277	95,981	96,616	0,210	96,826
14	326,4	8,06	356,2	281	0,613	2,095	0,293	96,002	96,615	0,206	96,821
15	371,2	8,09	374,9	278	0,631	2,281	0,277	95,984	96,615	0,191	96,806
16	404,5	8,11	391,6	277	0,619	2,395	0,258	95,996	96,615	0,177	96,792
17	400,5	8,06	309,6	294	0,619	1,845	0,336	95,996	96,615	0,206	96,821
18	468,5	8,07	312,7	280	0,615	1,842	0,334	96,000	96,615	0,204	96,819
19	510,0	8,07	348,0	276	0,620	2,035	0,305	95,995	96,615	0,209	96,824
20	415,5	8,09	365,5	288	0,615	2,180	0,282	96,000	96,615	0,185	96,800
21	515,0	8,07	279,0	284	0,614	1,630	0,377	96,001	96,615	0,210	96,825

$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	269,2	8,07	180,3	268	0,625	1,155	0,541	95,990	96,615	0,204	96,819
2	286,8	8,06	171,9	265	0,628	1,098	0,572	95,987	96,615	0,205	96,820
3	214,8	8,10	146,7	275	0,570	0,882	0,646	96,046	96,616	0,204	96,820
4	239,8	8,07	141,8	272	0,595	0,868	0,685	96,020	96,615	0,203	96,818
5	197,0	8,06	143,6	269	0,586	0,863	0,679	96,029	96,615	0,204	96,819
6	227,3	8,07	147,3	270	0,613	0,892	0,687	96,002	96,615	0,201	96,816
7	238,8	8,06	141,8	273	0,616	0,874	0,705	95,999	96,615	0,211	96,826
8	192,0	8,06	154,0	270	0,592	0,898	0,659	96,024	96,616	0,209	96,825
9	214,8	8,07	143,5	274	0,586	0,843	0,695	96,030	96,616	0,203	96,819
10	256,8	8,06	152,3	275	0,614	0,902	0,681	96,002	96,616	0,207	96,823
11	248,3	8,06	146,1	279	0,594	0,840	0,707	96,021	96,615	0,213	96,828
12	192,0	8,09	143,0	277	0,579	0,818	0,708	96,036	96,615	0,192	96,807
13	226,8	8,07	146,8	283	0,592	0,811	0,730	96,023	96,615	0,203	96,818
14	226,8	8,08	172,0	277	0,617	0,963	0,641	95,998	96,615	0,207	96,822
15	165,4	8,08	154,6	288	0,586	0,861	0,681	96,029	96,615	0,203	96,818
16	168,4	8,07	143,0	290	0,562	0,753	0,746	96,053	96,615	0,204	96,819
17	179,6	8,08	155,5	293	0,562	0,820	0,685	96,054	96,616	0,195	96,811
18	181,0	8,06	171,6	280	0,613	0,927	0,661	96,003	96,616	0,206	96,822
19	125,4	8,07	180,4	284	0,609	0,997	0,611	96,008	96,617	0,205	96,822
20	161,0	8,08	142,1	297	0,561	0,736	0,762	96,054	96,615	0,204	96,819
21	169,0	8,07	167,5	282	0,588	0,894	0,658	96,027	96,615	0,201	96,816

$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	169,0	8,06	175,8	274	0,569	1,014	0,561	96,046	96,615	0,213	96,828
2	232,3	8,04	314,8	269	0,620	2,270	0,273	95,995	96,615	0,205	96,820
3	217,8	8,05	343,4	235	0,631	2,447	0,258	95,984	96,615	0,203	96,818
4	236,0	8,05	280,2	277	0,609	1,962	0,310	96,006	96,615	0,204	96,819
5	277,6	8,05	287,4	242	0,652	2,091	0,312	95,963	96,615	0,198	96,813
6	249,8	8,05	285,9	242	0,618	2,101	0,294	95,997	96,615	0,201	96,816
7	225,0	8,05	253,5	230	0,660	1,919	0,344	95,955	96,615	0,200	96,815
8	303,2	8,05	274,0	247	0,608	1,935	0,314	96,007	96,615	0,208	96,823
9	226,8	8,05	246,1	229	0,616	1,796	0,343	95,999	96,615	0,212	96,827
10	205,3	8,06	231,0	276	0,597	1,658	0,360	96,019	96,616	0,202	96,818
11	235,8	8,05	236,2	272	0,620	1,755	0,353	95,995	96,615	0,203	96,818
12	215,3	8,05	229,4	252	0,620	1,676	0,370	95,997	96,617	0,202	96,819
13	262,8	8,05	319,4	302	0,600	2,040	0,294	96,016	96,616	0,208	96,824
14	268,8	8,05	331,6	261	0,588	2,135	0,275	96,027	96,615	0,206	96,821
15	221,8	8,05	313,7	303	0,592	1,991	0,297	96,023	96,615	0,207	96,822
16	279,2	8,05	286,3	288	0,602	1,826	0,330	96,013	96,615	0,216	96,831
17	268,8	8,05	274,8	284	0,603	1,754	0,344	96,012	96,615	0,207	96,822
18	219,0	8,06	236,7	295	0,589	1,591	0,370	96,026	96,615	0,200	96,815
19	216,0	8,05	235,8	261	0,591	1,534	0,385	96,024	96,615	0,199	96,814
20	265,2	8,06	263,4	269	0,607	1,696	0,358	96,008	96,615	0,201	96,816
21	292,8	8,06	306,7	265	0,611	1,935	0,316	96,004	96,615	0,208	96,823

$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	146,0	8,07	214,7	277	0,609	1,527	0,399	96,007	96,616	0,200	96,816
2	205,3	8,06	211,0	224	0,599	1,448	0,414	96,016	96,615	0,208	96,823
3	195,4	8,07	203,7	280	0,590	1,423	0,415	96,026	96,616	0,203	96,819
4	213,3	8,06	199,3	278	0,603	1,428	0,422	96,012	96,615	0,203	96,818
5	220,0	8,06	199,7	253	0,591	1,389	0,425	96,024	96,615	0,213	96,828
6	195,0	8,07	192,3	286	0,602	1,336	0,451	96,014	96,616	0,202	96,818
7	216,3	8,06	190,9	246	0,595	1,350	0,441	96,020	96,615	0,204	96,819
8	212,3	8,05	202,0	283	0,625	1,443	0,433	95,991	96,616	0,211	96,827
9	217,8	8,06	193,4	285	0,602	1,301	0,463	96,013	96,615	0,211	96,826
10	209,3	8,07	197,1	243	0,606	1,372	0,442	96,010	96,616	0,201	96,817
11	166,6	8,07	159,4	289	0,603	1,127	0,535	96,012	96,615	0,199	96,814
12	206,0	8,07	221,2	315	0,582	1,331	0,437	96,033	96,615	0,214	96,829
13	227,3	8,07	220,1	312	0,593	1,341	0,442	96,023	96,616	0,212	96,828
14	213,8	8,07	238,8	282	0,643	1,474	0,436	95,972	96,615	0,208	96,823
15	201,0	8,07	198,0	306	0,593	1,200	0,494	96,023	96,616	0,208	96,824
16	170,4	8,07	174,8	317	0,600	1,060	0,566	96,016	96,616	0,203	96,819
17	183,0	8,07	191,7	296	0,586	1,117	0,525	96,029	96,615	0,199	96,814
18	201,3	8,07	181,2	266	0,581	1,124	0,517	96,034	96,615	0,211	96,826
19	193,4	8,07	157,4	308	0,600	0,937	0,640	96,015	96,615	0,203	96,818
20	153,4	8,07	143,6	317	0,590	0,833	0,708	96,025	96,615	0,202	96,817
21	148,7	8,08	142,3	305	0,598	0,847	0,706	96,017	96,615	0,196	96,811

$K = 12$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{w1} [mm]	d_{12} [mm]	d_{w2} [mm]
1	600,0	8,06	405,7	272	0,627	2,758	0,227	95,988	96,615	0,203	96,818
2	432,5	8,07	308,2	270	0,612	2,065	0,296	96,003	96,615	0,191	96,806
3	496,5	8,07	431,9	272	0,609	2,867	0,212	96,006	96,615	0,207	96,822
4	418,5	8,07	272,2	252	0,611	1,807	0,338	96,004	96,615	0,192	96,807
5	457,0	8,08	247,8	267	0,590	1,565	0,377	96,025	96,615	0,194	96,809
6	454,0	8,09	256,2	240	0,586	1,651	0,355	96,029	96,615	0,191	96,806
7	525,8	8,08	265,2	286	0,618	1,804	0,343	95,997	96,615	0,197	96,812
8	440,5	8,09	264,6	252	0,611	1,703	0,359	96,004	96,615	0,189	96,804
9	380,4	8,08	238,2	304	0,606	1,572	0,385	96,009	96,615	0,180	96,795
10	437,0	8,07	339,5	271	0,610	2,232	0,273	96,007	96,617	0,208	96,825
11	425,0	8,07	333,6	261	0,603	2,191	0,275	96,012	96,615	0,205	96,820
12	481,5	8,07	270,4	244	0,609	1,725	0,353	96,007	96,616	0,196	96,812
13	489,5	8,06	329,0	282	0,577	2,052	0,281	96,038	96,615	0,216	96,831
14	491,0	8,08	283,7	285	0,614	1,770	0,347	96,001	96,615	0,197	96,812
15	471,5	8,08	785,5	257	0,632	5,935	0,106	95,983	96,615	0,255	96,870
16	381,2	8,07	762,9	281	0,618	5,632	0,110	95,997	96,615	0,205	96,820
17	528,0	8,08	691,6	228	0,632	5,100	0,124	95,984	96,616	0,253	96,869
18	485,5	8,08	754,2	229	0,617	5,490	0,112	95,998	96,615	0,264	96,879
19	409,5	8,08	737,7	258	0,631	5,495	0,115	95,984	96,615	0,190	96,805
20	456,5	8,08	706,4	225	0,627	5,188	0,121	95,988	96,615	0,257	96,872
21	525,8	8,08	702,8	242	0,617	5,095	0,121	95,998	96,615	0,254	96,869

$K = 12$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{w1} [mm]	d_{12} [mm]	d_{w2} [mm]
1	300,8	8,04	610,6	274	0,604	4,738	0,127	96,011	96,615	0,206	96,821
2	304,8	8,05	583,0	270	0,609	4,445	0,137	96,006	96,615	0,209	96,824
3	350,8	8,05	573,2	273	0,611	4,396	0,139	96,004	96,615	0,204	96,819
4	365,2	8,05	556,7	243	0,579	4,159	0,139	96,036	96,615	0,213	96,828
5	319,6	8,05	557,9	232	0,648	4,352	0,149	95,968	96,616	0,200	96,816
6	211,0	8,06	493,4	261	0,607	3,917	0,155	96,008	96,615	0,196	96,811
7	334,8	8,04	526,9	288	0,624	4,068	0,153	95,991	96,615	0,208	96,823
8	321,2	8,02	603,7	292	0,626	4,663	0,134	95,989	96,615	0,226	96,841
9	309,6	8,04	521,2	256	0,599	3,996	0,150	96,016	96,615	0,209	96,824
10	327,2	8,04	523,5	242	0,604	3,972	0,152	96,011	96,615	0,215	96,830
11	315,2	8,03	503,2	267	0,586	3,750	0,156	96,029	96,615	0,227	96,842
12	304,0	8,04	484,4	255	0,596	3,629	0,164	96,019	96,615	0,211	96,826
13	376,8	8,02	752,6	263	0,608	5,032	0,121	96,007	96,615	0,231	96,846
14	330,8	8,01	713,5	272	0,588	4,843	0,121	96,027	96,615	0,233	96,848
15	366,8	8,01	780,1	310	0,605	5,230	0,116	96,010	96,615	0,241	96,856
16	364,8	8,01	741,4	282	0,618	4,923	0,126	95,997	96,615	0,233	96,848
17	329,2	8,02	696,4	286	0,635	4,715	0,135	95,980	96,615	0,225	96,840
18	310,8	8,01	686,9	289	0,601	4,513	0,133	96,014	96,615	0,230	96,845
19	233,3	8,04	591,3	289	0,601	4,063	0,148	96,014	96,615	0,203	96,818
20	326,4	8,02	675,4	275	0,613	4,520	0,136	96,002	96,615	0,223	96,838
21	291,2	8,04	684,7	276	0,629	4,583	0,137	95,987	96,616	0,209	96,825



$K = 12$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	243,8	8,05	447,1	293	0,609	3,325	0,183	96,007	96,616	0,199	96,815
2	256,4	8,05	425,1	240	0,609	3,254	0,187	96,006	96,615	0,205	96,820
3	213,8	8,05	376,1	255	0,615	2,944	0,209	96,000	96,615	0,198	96,813
4	271,2	8,04	399,4	264	0,607	2,976	0,204	96,008	96,615	0,204	96,819
5	220,0	8,05	383,7	287	0,594	2,804	0,212	96,022	96,616	0,201	96,817
6	229,8	8,05	382,5	264	0,599	2,876	0,208	96,016	96,615	0,196	96,811
7	241,3	8,06	327,8	304	0,601	2,346	0,256	96,015	96,616	0,196	96,812
8	278,8	8,05	412,9	237	0,608	3,069	0,198	96,007	96,615	0,205	96,820
9	286,4	8,04	474,8	272	0,615	3,425	0,180	96,000	96,615	0,212	96,827
10	270,4	8,07	287,5	265	0,608	2,102	0,289	96,007	96,615	0,196	96,811
11	192,4	8,06	290,4	280	0,604	2,080	0,290	96,011	96,615	0,197	96,812
12	308,8	8,05	508,0	296	0,599	3,313	0,181	96,016	96,615	0,213	96,828
13	274,8	8,06	419,5	322	0,572	2,621	0,218	96,043	96,615	0,206	96,821
14	268,8	8,06	374,2	320	0,592	2,415	0,245	96,023	96,615	0,207	96,822
15	183,6	8,07	263,2	308	0,590	1,671	0,353	96,025	96,615	0,190	96,805
16	311,6	8,06	455,3	272	0,635	2,871	0,221	95,980	96,615	0,205	96,820
17	246,0	8,06	368,5	308	0,621	2,270	0,274	95,994	96,615	0,204	96,819
18	260,8	8,06	348,1	279	0,589	2,051	0,287	96,026	96,615	0,203	96,818
19	239,0	8,07	309,1	278	0,572	1,842	0,311	96,043	96,615	0,201	96,816
20	244,8	8,06	403,8	299	0,589	2,451	0,240	96,026	96,615	0,205	96,820
21	257,6	8,06	280,4	302	0,584	1,734	0,337	96,031	96,615	0,197	96,812

$K = 12$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	216,8	8,09	242,1	297	0,592	1,626	0,364	96,024	96,616	0,195	96,811
2	179,4	8,08	224,0	272	0,582	1,539	0,378	96,033	96,615	0,199	96,814
3	191,4	8,08	254,0	284	0,582	1,646	0,354	96,033	96,615	0,200	96,815
4	204,3	8,08	201,2	235	0,568	1,340	0,424	96,047	96,615	0,192	96,807
5	253,6	8,07	243,9	229	0,582	1,660	0,351	96,033	96,615	0,202	96,817
6	178,6	8,08	203,6	286	0,581	1,369	0,424	96,034	96,615	0,189	96,804
7	244,3	8,07	237,2	246	0,603	1,595	0,378	96,012	96,615	0,203	96,818
8	193,4	8,09	202,7	264	0,584	1,383	0,422	96,031	96,615	0,190	96,805
9	157,0	8,08	209,7	287	0,582	1,396	0,417	96,033	96,615	0,195	96,810
10	180,6	8,08	208,1	284	0,579	1,372	0,422	96,036	96,615	0,202	96,817
11	146,7	8,08	187,7	258	0,568	1,281	0,443	96,047	96,615	0,190	96,805
12	235,0	8,07	229,1	326	0,565	1,341	0,421	96,050	96,615	0,206	96,821
13	182,6	8,08	237,9	328	0,574	1,377	0,417	96,041	96,615	0,204	96,819
14	179,6	8,08	244,7	292	0,576	1,410	0,409	96,039	96,615	0,201	96,816
15	174,6	8,07	247,4	300	0,580	1,410	0,411	96,035	96,615	0,206	96,821
16	192,0	8,07	251,8	297	0,580	1,435	0,404	96,035	96,615	0,208	96,823
17	150,6	8,07	246,8	311	0,571	1,392	0,410	96,044	96,615	0,210	96,825
18	217,8	8,06	292,2	290	0,595	1,814	0,328	96,020	96,615	0,196	96,811
19	228,8	8,03	768,4	273	0,588	5,480	0,107	96,027	96,615	0,222	96,837
20	222,3	8,04	771,2	281	0,610	5,289	0,115	96,007	96,617	0,211	96,828
21	176,6	8,02	806,7	303	0,602	5,499	0,109	96,013	96,615	0,208	96,823

$K = 15 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{12} [mm]	d_{1f} [mm]
1	693,8	8,05	1082,7	262	0,631	8,306	0,076	95,984	96,615	0,184	96,799
2	769,6	7,98	974,7	262	0,627	7,483	0,084	95,988	96,615	0,229	96,844
3	725,3	8,04	1005,5	257	0,648	7,874	0,082	95,967	96,615	0,181	96,796
4	848,0	7,96	1101,4	245	0,631	8,190	0,077	95,984	96,615	0,234	96,849
5	782,4	7,98	936,6	254	0,601	7,168	0,084	96,014	96,615	0,234	96,849
6	726,0	8,04	864,1	251	0,636	6,355	0,100	95,979	96,615	0,182	96,797
7	721,5	8,04	976,6	249	0,620	7,200	0,086	95,995	96,615	0,189	96,804
8	573,0	8,05	699,0	238	0,635	5,196	0,122	95,980	96,615	0,158	96,773
9	803,0	7,97	890,5	269	0,668	6,564	0,102	95,947	96,615	0,226	96,841
10	741,0	8,03	935,3	291	0,625	6,688	0,093	95,990	96,615	0,189	96,804
11	636,8	8,06	640,5	253	0,632	4,654	0,136	95,983	96,615	0,169	96,784
12	421,5	7,97	2053,0	278	0,661	13,757	0,048	95,954	96,615	0,264	96,879
13	264,0	8,02	2050,2	276	0,651	13,065	0,050	95,964	96,615	0,253	96,868
14	149,7	8,00	2044,1	286	0,657	12,963	0,051	95,958	96,615	0,299	96,914
15	139,7	7,94	1889,3	275	0,646	12,043	0,054	95,969	96,615	0,293	96,908
16	216,0	7,93	2029,2	289	0,672	12,777	0,053	95,943	96,615	0,331	96,946
17	848,0	8,00	1429,8	348	0,585	8,405	0,070	96,030	96,615	0,203	96,818
18	869,0	7,96	1628,9	318	0,616	9,180	0,067	95,999	96,615	0,222	96,837
19	787,0	8,02	1256,2	318	0,590	7,432	0,079	96,025	96,615	0,186	96,801
20	630,0	8,01	1000,1	322	0,599	6,131	0,098	96,016	96,615	0,173	96,788
21	789,0	8,00	1162,4	306	0,586	6,852	0,086	96,029	96,615	0,187	96,802

$K = 15 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{12} [mm]	d_{1f} [mm]
1	233,3	8,03	624,6	263,0	0,592	4,415	0,134	96,024	96,616	0,181	96,797
2	298,8	8,04	496,4	253,0	0,608	3,692	0,165	96,007	96,615	0,185	96,800
3	250,0	8,02	657,5	263,0	0,619	4,619	0,134	95,996	96,615	0,186	96,801
4	263,2	8,00	720,5	269,0	0,590	5,140	0,115	96,025	96,615	0,203	96,818
5	281,6	8,04	479,8	276,0	0,578	3,418	0,169	96,037	96,615	0,180	96,795
6	281,6	8,05	520,8	283,0	0,600	3,631	0,165	96,016	96,616	0,179	96,795
7	280,8	8,03	525,2	278,0	0,596	3,726	0,160	96,019	96,615	0,184	96,799
8	328,8	8,04	503,2	247,0	0,610	3,610	0,169	96,005	96,615	0,182	96,797
9	297,6	8,04	518,3	274,0	0,608	3,720	0,163	96,007	96,615	0,188	96,803
10	299,2	8,04	494,6	272,0	0,580	3,427	0,169	96,035	96,615	0,191	96,806
11	275,2	8,04	516,3	271,0	0,578	3,562	0,162	96,037	96,615	0,191	96,806
12	329,2	8,02	1379,8	292,0	0,627	9,677	0,065	95,988	96,615	0,191	96,806
13	383,6	8,04	1261,7	270,0	0,610	8,740	0,070	96,005	96,615	0,190	96,805
14	433,0	8,03	1328,2	268,0	0,660	9,483	0,070	95,955	96,615	0,199	96,814
15	427,5	8,02	1123,6	284,0	0,596	7,781	0,077	96,019	96,615	0,192	96,807
16	492,5	8,01	1176,3	283,0	0,605	8,057	0,075	96,010	96,615	0,194	96,809
17	474,0	8,01	955,4	328,0	0,600	5,701	0,105	96,015	96,615	0,187	96,802
18	341,6	8,02	760,6	347,0	0,608	4,565	0,133	96,007	96,615	0,174	96,789
19	232,8	8,02	685,1	300,0	0,580	4,048	0,143	96,035	96,615	0,171	96,786
20	300,0	8,03	666,6	334,0	0,581	3,901	0,149	96,034	96,615	0,170	96,785
21	342,8	8,04	653,6	297,0	0,588	3,986	0,148	96,027	96,615	0,175	96,790

$K = 15 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	252,4	8,03	1487,3	286	0,613	11,954	0,051	96,002	96,615	0,191	96,806
2	370,4	7,97	1419,2	261	0,610	11,427	0,053	96,005	96,615	0,229	96,844
3	264,4	8,04	1514,0	231	0,667	12,819	0,052	95,948	96,615	0,193	96,808
4	264,2	8,04	1434,5	261	0,615	11,727	0,052	96,000	96,615	0,195	96,810
5	268,8	8,03	1282,8	286	0,617	10,500	0,059	96,000	96,617	0,183	96,800
6	293,2	8,01	1293,4	276	0,630	10,460	0,060	95,986	96,616	0,191	96,807
7	272,8	8,04	1215,8	248	0,617	10,046	0,061	95,999	96,616	0,178	96,794
8	307,2	8,02	1304,9	277	0,628	10,484	0,060	95,987	96,615	0,200	96,815
9	252,8	8,02	1281,0	287	0,619	10,244	0,060	95,996	96,615	0,203	96,818
10	486,0	7,97	1349,3	284	0,677	10,803	0,063	95,938	96,615	0,217	96,832
11	295,6	8,00	1196,5	252	0,634	9,533	0,067	95,982	96,616	0,200	96,816
12	350,4	8,04	934,2	307	0,607	6,427	0,094	96,008	96,615	0,190	96,805
13	294,8	8,01	892,2	274	0,631	6,049	0,104	95,984	96,615	0,175	96,790
14	280,8	8,03	793,0	304	0,612	5,282	0,116	96,003	96,615	0,180	96,795
15	38,3	7,98	1778,6	324	0,628	10,575	0,059	95,987	96,615	0,306	96,921
16	340,4	8,02	907,8	316	0,603	6,012	0,100	96,012	96,615	0,185	96,800
17	247,8	8,05	644,9	289	0,581	3,714	0,156	96,034	96,615	0,174	96,789
18	264,0	8,05	600,4	314	0,559	3,524	0,159	96,056	96,615	0,177	96,792
19	244,0	8,04	580,7	313	0,576	3,391	0,170	96,039	96,615	0,175	96,790
20	262,0	8,04	623,2	334	0,571	3,597	0,159	96,044	96,615	0,178	96,793
21	272,4	8,05	590,7	322	0,584	3,502	0,167	96,031	96,615	0,176	96,791

$K = 15 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{wft} [mm]
1	223,0	8,03	989,4	263	0,608	8,036	0,076	96,007	96,615	0,192	96,807
2	314,4	8,03	1068,6	282	0,613	8,564	0,072	96,002	96,615	0,198	96,813
3	288,4	8,03	1011,6	274	0,621	8,023	0,077	95,994	96,615	0,195	96,810
4	209,0	8,03	880,5	244	0,613	7,129	0,086	96,002	96,615	0,180	96,795
5	264,4	8,03	931,5	282	0,606	7,383	0,082	96,009	96,615	0,191	96,806
6	251,6	8,03	888,4	290	0,609	6,918	0,088	96,006	96,615	0,191	96,806
7	218,3	8,06	782,6	299	0,613	6,094	0,101	96,002	96,615	0,173	96,788
8	190,4	8,05	718,6	275	0,604	5,802	0,104	96,011	96,615	0,176	96,791
9	221,8	8,06	739,0	305	0,618	5,655	0,109	95,998	96,616	0,171	96,787
10	239,0	8,03	809,4	288	0,614	6,246	0,098	96,001	96,615	0,190	96,805
11	200,0	8,07	638,7	294	0,620	4,907	0,126	95,995	96,615	0,167	96,782
12	222,0	8,05	547,5	312	0,565	3,333	0,170	96,050	96,615	0,195	96,810
13	229,3	8,02	1818,2	265	0,598	13,115	0,046	96,017	96,615	0,203	96,818
14	224,3	8,03	1878,6	248	0,608	13,580	0,045	96,007	96,615	0,198	96,813
15	307,2	8,03	1833,5	279	0,654	13,367	0,049	95,961	96,615	0,197	96,812
16	18,7	7,99	2346,1	299	0,602	14,900	0,040	96,013	96,615	0,311	96,926
17	240,3	8,03	530,9	337	0,575	3,087	0,186	96,040	96,615	0,185	96,800
18	263,6	8,03	1704,9	296	0,617	11,222	0,055	95,998	96,615	0,188	96,803
19	284,0	8,00	1664,0	274	0,606	10,979	0,055	96,009	96,615	0,187	96,802
20	249,0	8,01	1625,0	281	0,603	10,731	0,056	96,012	96,615	0,178	96,793
21	245,0	8,02	1734,5	290	0,617	11,085	0,056	95,998	96,615	0,186	96,801

Příloha 7 – Naměřená data - vliv změny svařovacího tlaku p_w

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	223,3	8,11	76,1	467	0,629	0,264	2,383	95,987	96,616	0,174	96,790
2	231,0	8,10	81,3	521	0,626	0,277	2,260	95,992	96,618	0,181	96,799
3	165,0	8,12	80,8	477	0,618	0,283	2,184	95,999	96,617	0,173	96,790
4	162,0	8,14	79,8	468	0,642	0,281	2,285	95,974	96,616	0,166	96,782
5	145,1	8,15	78,4	479	0,625	0,269	2,323	95,990	96,615	0,173	96,788
6	280,0	8,13	75,8	543	0,671	0,266	2,523	95,944	96,615	0,175	96,790
7	217,0	8,10	81,2	490	0,624	0,275	2,269	95,992	96,616	0,182	96,798
8	188,4	8,13	76,8	476	0,633	0,268	2,362	95,984	96,617	0,172	96,789
9	209,3	8,14	81,7	508	0,633	0,268	2,362	95,983	96,616	0,179	96,795
10	209,8	8,11	78,1	551	0,632	0,264	2,394	95,983	96,615	0,187	96,802
11	219,3	8,10	75,8	563	0,611	0,258	2,368	96,005	96,616	0,190	96,806
12	264,0	8,07	69,8	588	0,572	0,219	2,612	96,043	96,615	0,196	96,811
13	310,8	8,05	71,1	566	0,573	0,220	2,605	96,043	96,616	0,200	96,816
14	295,6	8,06	67,5	572	0,562	0,215	2,614	96,055	96,617	0,203	96,820
15	235,3	8,10	90,6	556	0,587	0,294	1,997	96,029	96,616	0,165	96,781
16	271,2	8,08	87,6	525	0,638	0,292	2,185	95,978	96,616	0,182	96,798
17	225,0	8,07	90,5	561	0,629	0,286	2,199	95,988	96,617	0,179	96,796
18	280,0	8,07	89,7	554	0,592	0,287	2,063	96,023	96,615	0,168	96,783
19	241,0	8,09	91,3	551	0,584	0,289	2,021	96,031	96,615	0,175	96,790
20	234,0	8,09	92,9	557	0,602	0,294	2,048	96,014	96,616	0,176	96,792
21	241,3	8,09	95,3	559	0,598	0,298	2,007	96,019	96,617	0,170	96,787

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	131,4	8,14	62,1	483	0,593	0,238	2,492	96,024	96,617	0,171	96,788
2	136,1	8,12	60,2	466	0,615	0,241	2,552	96,001	96,616	0,188	96,804
3	151,0	8,14	60,7	471	0,606	0,239	2,536	96,010	96,616	0,178	96,794
4	106,4	8,16	72,8	513	0,598	0,262	2,282	96,020	96,618	0,176	96,794
5	180,4	8,16	71,1	497	0,590	0,259	2,278	96,026	96,616	0,169	96,785
6	150,4	8,11	61,4	469	0,619	0,240	2,579	95,998	96,617	0,187	96,804
7	129,3	8,13	70,1	540	0,591	0,253	2,336	96,026	96,617	0,193	96,810
8	123,6	8,13	59,7	474	0,581	0,232	2,504	96,035	96,616	0,185	96,801
9	114,6	8,12	62,7	484	0,588	0,236	2,492	96,027	96,615	0,178	96,793
10	107,0	8,13	61,6	493	0,572	0,232	2,466	96,044	96,616	0,179	96,795
11	178,6	8,14	68,9	507	0,622	0,245	2,539	95,994	96,616	0,188	96,804
12	123,4	8,08	66,9	478	0,600	0,256	2,344	96,015	96,615	0,191	96,806
13	178,6	8,06	69,7	468	0,590	0,259	2,278	96,028	96,618	0,199	96,817
14	172,0	8,08	69,6	446	0,585	0,260	2,250	96,032	96,617	0,195	96,812
15	176,4	8,08	69,2	479	0,591	0,256	2,309	96,026	96,617	0,201	96,818
16	144,3	8,06	67,3	455	0,608	0,256	2,375	96,008	96,616	0,198	96,814
17	155,0	8,08	69,2	465	0,594	0,256	2,320	96,021	96,615	0,199	96,814
18	205,3	8,07	68,0	458	0,598	0,254	2,354	96,018	96,616	0,204	96,820
19	159,6	8,06	66,7	444	0,594	0,251	2,367	96,023	96,617	0,210	96,827
20	119,4	8,04	69,3	444	0,611	0,260	2,350	96,006	96,617	0,207	96,824
21	180,4	8,08	68,4	467	0,588	0,250	2,352	96,027	96,615	0,195	96,810

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	123,0	8,11	65,4	500	0,580	0,251	2,311	96,035	96,615	0,181	96,796
2	105,4	8,11	61,3	490	0,598	0,247	2,421	96,021	96,619	0,197	96,816
3	143,7	8,08	62,4	483	0,597	0,249	2,398	96,020	96,617	0,193	96,810
4	152,4	8,08	67,2	445	0,608	0,259	2,347	96,009	96,617	0,178	96,795
5	85,0	8,11	64,2	501	0,603	0,253	2,383	96,014	96,617	0,183	96,800
6	131,0	8,12	63,8	501	0,604	0,244	2,475	96,013	96,617	0,192	96,809
7	92,7	8,11	64,6	497	0,581	0,248	2,343	96,035	96,616	0,188	96,804
8	111,4	8,12	62,4	488	0,589	0,240	2,454	96,028	96,617	0,181	96,798
9	125,4	8,09	62,6	452	0,592	0,246	2,407	96,025	96,617	0,200	96,817
10	105,0	8,11	56,9	505	0,573	0,230	2,491	96,043	96,616	0,189	96,805
11	113,4	8,12	62,4	497	0,595	0,239	2,490	96,022	96,617	0,182	96,799
12	113,4	8,05	58,0	454	0,589	0,229	2,572	96,027	96,616	0,221	96,837
13	90,0	8,05	59,8	454	0,577	0,229	2,520	96,040	96,617	0,216	96,833
14	100,0	8,03	56,4	443	0,590	0,224	2,634	96,027	96,617	0,218	96,835
15	84,3	8,05	51,9	402	0,589	0,216	2,727	96,028	96,617	0,215	96,832
16	118,4	8,08	55,7	423	0,593	0,219	2,708	96,025	96,618	0,215	96,833
17	146,4	8,06	66,1	479	0,580	0,239	2,427	96,037	96,617	0,201	96,818
18	108,0	8,08	58,2	448	0,599	0,228	2,627	96,018	96,617	0,212	96,829
19	121,4	8,07	63,2	478	0,577	0,230	2,509	96,038	96,615	0,205	96,820
20	123,4	8,07	51,4	429	0,570	0,208	2,740	96,045	96,615	0,220	96,835
21	122,0	8,06	52,8	419	0,587	0,215	2,730	96,030	96,617	0,214	96,831

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	63,7	8,11	58,4	412	0,571	0,242	2,360	96,046	96,617	0,187	96,804
2	82,3	8,09	52,0	401	0,601	0,227	2,648	96,015	96,616	0,203	96,819
3	63,7	8,10	55,4	392	0,590	0,235	2,511	96,026	96,616	0,199	96,815
4	91,3	8,11	59,8	435	0,599	0,240	2,496	96,017	96,616	0,197	96,813
5	86,3	8,09	54,3	395	0,585	0,232	2,522	96,030	96,615	0,197	96,812
6	86,0	8,10	54,4	391	0,583	0,230	2,535	96,032	96,615	0,203	96,818
7	101,4	8,09	57,3	412	0,583	0,236	2,470	96,034	96,617	0,199	96,816
8	88,3	8,12	58,4	413	0,587	0,241	2,436	96,031	96,618	0,199	96,817
9	82,7	8,10	57,7	424	0,595	0,237	2,511	96,020	96,615	0,197	96,812
10	110,6	8,10	63,9	470	0,583	0,248	2,351	96,032	96,615	0,204	96,819
11	81,7	8,09	58,6	471	0,576	0,230	2,504	96,039	96,615	0,199	96,814
12	126,6	8,10	45,7	456	0,573	0,192	2,984	96,044	96,617	0,203	96,820
13	119,0	8,09	49,5	407	0,576	0,201	2,866	96,039	96,615	0,208	96,823
14	59,0	8,09	52,9	552	0,583	0,206	2,830	96,034	96,617	0,210	96,827
15	102,0	8,09	55,2	558	0,563	0,205	2,746	96,052	96,615	0,220	96,835
16	11,4	8,07	60,2	470	0,584	0,220	2,655	96,034	96,618	0,218	96,836
17	109,4	8,09	48,9	541	0,560	0,194	2,887	96,056	96,616	0,216	96,832
18	108,4	8,08	48,5	489	0,548	0,194	2,825	96,067	96,615	0,210	96,825
19	103,4	8,10	49,9	480	0,582	0,199	2,925	96,035	96,617	0,213	96,830
20	94,7	8,09	57,6	534	0,570	0,208	2,740	96,046	96,616	0,218	96,834
21	117,4	8,10	49,3	461	0,560	0,196	2,857	96,057	96,617	0,208	96,825

$K = 3$ [1]; $p_w = 100$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	206,0	8,10	67,8	609	0,636	0,237	2,684	95,989	96,625	0,183	96,808
2	188,0	8,14	68,3	603	0,627	0,233	2,691	95,989	96,616	0,179	96,795
3	179,0	8,13	69,8	604	0,634	0,240	2,642	95,984	96,618	0,179	96,797
4	194,3	8,13	72,5	607	0,642	0,239	2,686	95,976	96,618	0,182	96,800
5	217,3	8,18	74,5	589	0,626	0,244	2,566	95,991	96,617	0,167	96,784
6	169,6	8,12	63,9	581	0,632	0,228	2,772	95,984	96,616	0,176	96,792
7	192,3	8,08	69,3	621	0,630	0,233	2,704	95,989	96,619	0,205	96,824
8	192,0	8,01	67,0	619	0,648	0,232	2,793	95,972	96,620	0,192	96,812
9	214,7	8,11	68,8	620	0,619	0,229	2,703	95,996	96,615	0,185	96,800
10	183,3	8,13	70,6	615	0,620	0,237	2,616	95,995	96,615	0,174	96,789
11	166,0	8,13	71,9	618	0,626	0,236	2,653	95,990	96,616	0,177	96,793
12	184,3	8,12	69,5	626	0,621	0,228	2,724	95,996	96,617	0,179	96,796
13	185,7	8,12	68,6	627	0,618	0,227	2,722	95,997	96,615	0,186	96,801
14	223,7	8,11	68,2	620	0,613	0,228	2,689	96,004	96,617	0,188	96,805
15	160,0	8,13	70,5	614	0,619	0,231	2,680	96,000	96,619	0,177	96,796
16	215,7	8,08	63,9	611	0,605	0,219	2,763	96,013	96,618	0,212	96,830
17	188,7	8,09	64,7	607	0,613	0,221	2,774	96,003	96,616	0,191	96,807
18	250,7	8,10	63,2	610	0,626	0,217	2,885	95,998	96,624	0,198	96,822
19	194,7	8,12	66,6	629	0,610	0,222	2,748	96,006	96,616	0,191	96,807
20	215,3	8,12	65,8	611	0,609	0,224	2,719	96,007	96,616	0,190	96,806
21	192,7	8,12	65,6	616	0,619	0,218	2,839	95,998	96,617	0,184	96,801

$K = 3$ [1]; $p_w = 100$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	107,6	8,15	55,8	515	0,608	0,218	2,789	96,007	96,615	0,184	96,799
2	84,7	8,18	55,9	523	0,584	0,219	2,667	96,032	96,616	0,169	96,785
3	104,4	8,13	61,1	627	0,616	0,226	2,726	96,000	96,616	0,176	96,792
4	90,7	8,15	63,8	605	0,641	0,234	2,739	95,980	96,621	0,184	96,805
5	109,4	8,15	63,8	626	0,608	0,230	2,643	96,010	96,618	0,175	96,793
6	129,6	8,14	59,1	597	0,609	0,220	2,768	96,008	96,617	0,187	96,804
7	107,0	8,15	53,7	467	0,645	0,217	2,972	95,972	96,617	0,192	96,809
8	108,6	8,15	60,3	589	0,638	0,223	2,861	95,977	96,615	0,175	96,790
9	95,7	8,12	58,7	514	0,608	0,225	2,702	96,007	96,615	0,191	96,806
10	117,0	8,15	61,5	573	0,631	0,227	2,780	95,987	96,618	0,190	96,808
11	111,0	8,10	58,8	617	0,642	0,225	2,853	95,977	96,619	0,191	96,810
12	130,4	8,13	53,4	519	0,603	0,208	2,899	96,013	96,616	0,187	96,803
13	149,4	8,15	56,1	554	0,592	0,210	2,819	96,024	96,616	0,182	96,798
14	107,4	8,15	58,0	593	0,589	0,213	2,765	96,028	96,617	0,194	96,811
15	113,4	8,13	58,4	619	0,630	0,215	2,930	95,986	96,616	0,195	96,811
16	111,4	8,14	59,6	621	0,603	0,220	2,741	96,013	96,616	0,203	96,819
17	118,6	8,13	58,3	555	0,588	0,214	2,748	96,031	96,619	0,184	96,803
18	125,7	8,13	54,0	517	0,589	0,205	2,873	96,026	96,615	0,199	96,814
19	99,0	8,13	50,9	507	0,575	0,199	2,889	96,041	96,616	0,200	96,816
20	117,4	8,13	49,9	544	0,586	0,197	2,975	96,029	96,615	0,197	96,812
21	136,7	8,12	56,0	615	0,628	0,210	2,990	95,989	96,617	0,192	96,809

$K = 3$ [1]; $p_w = 100$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	97,7	8,10	55,5	503	0,636	0,226	2,814	95,982	96,618	0,206	96,824
2	74,3	8,09	55,0	513	0,620	0,225	2,756	95,996	96,616	0,199	96,815
3	109,6	8,10	53,5	494	0,605	0,222	2,725	96,013	96,618	0,203	96,821
4	115,4	8,08	58,2	516	0,603	0,232	2,599	96,016	96,619	0,209	96,828
5	74,0	8,08	54,7	502	0,602	0,221	2,724	96,016	96,618	0,202	96,820
6	111,6	8,08	59,0	520	0,595	0,228	2,610	96,027	96,622	0,215	96,837
7	93,0	8,10	57,0	525	0,639	0,225	2,840	95,977	96,616	0,198	96,814
8	90,3	8,09	54,2	518	0,595	0,220	2,705	96,021	96,616	0,206	96,822
9	115,6	8,10	53,8	507	0,587	0,218	2,693	96,030	96,617	0,198	96,815
10	114,0	8,09	50,8	501	0,598	0,211	2,834	96,020	96,618	0,212	96,830
11	124,0	8,10	49,0	476	0,574	0,207	2,773	96,041	96,615	0,203	96,818
12	122,6	8,10	58,6	530	0,600	0,224	2,679	96,017	96,617	0,219	96,836
13	117,0	8,12	51,8	503	0,574	0,209	2,746	96,041	96,615	0,198	96,813
14	104,6	8,12	51,9	517	0,592	0,208	2,846	96,024	96,616	0,205	96,821
15	109,4	8,12	53,2	512	0,594	0,213	2,789	96,021	96,615	0,211	96,826
16	95,0	8,14	55,6	514	0,592	0,212	2,792	96,026	96,618	0,201	96,819
17	118,4	8,13	52,7	510	0,591	0,212	2,788	96,024	96,615	0,201	96,816
18	109,6	8,13	49,7	500	0,585	0,201	2,910	96,032	96,617	0,189	96,806
19	89,7	8,12	53,2	510	0,586	0,210	2,790	96,032	96,618	0,201	96,819
20	100,6	8,13	52,7	506	0,580	0,208	2,788	96,035	96,615	0,206	96,821
21	94,3	8,11	51,4	514	0,582	0,207	2,812	96,035	96,617	0,202	96,819

$K = 3$ [1]; $p_w = 100$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	67,0	8,10	54,7	479	0,594	0,213	2,789	96,024	96,618	0,200	96,818
2	82,7	8,10	52,1	478	0,584	0,213	2,742	96,034	96,618	0,199	96,817
3	81,7	8,10	52,5	492	0,593	0,211	2,810	96,024	96,617	0,202	96,819
4	73,0	8,10	48,3	475	0,600	0,203	2,956	96,018	96,618	0,203	96,821
5	94,7	8,10	48,7	460	0,586	0,205	2,859	96,030	96,616	0,206	96,822
6	83,7	8,12	54,0	516	0,582	0,213	2,732	96,033	96,615	0,207	96,822
7	82,0	8,10	46,8	466	0,570	0,197	2,893	96,047	96,617	0,204	96,821
8	96,7	8,11	49,5	477	0,598	0,206	2,903	96,017	96,615	0,206	96,821
9	76,0	8,09	51,6	490	0,587	0,206	2,850	96,034	96,621	0,207	96,828
10	105,0	8,11	48,5	468	0,584	0,200	2,920	96,032	96,616	0,201	96,817
11	71,0	8,10	52,2	505	0,585	0,208	2,813	96,031	96,616	0,206	96,822
12	75,0	8,10	60,5	563	0,631	0,254	2,484	95,985	96,616	0,190	96,806
13	82,0	8,09	54,7	491	0,626	0,243	2,576	95,989	96,615	0,189	96,804
14	103,6	8,10	58,0	529	0,623	0,247	2,522	95,993	96,616	0,184	96,800
15	85,3	8,10	54,3	480	0,601	0,245	2,453	96,018	96,619	0,186	96,805
16	66,0	8,09	56,6	527	0,604	0,242	2,496	96,016	96,620	0,183	96,803
17	90,0	8,08	53,0	479	0,601	0,234	2,568	96,014	96,615	0,193	96,808
18	77,7	8,10	54,4	498	0,601	0,239	2,515	96,017	96,618	0,190	96,808
19	90,3	8,09	56,0	501	0,609	0,243	2,506	96,008	96,617	0,194	96,811
20	74,7	8,09	56,2	490	0,599	0,236	2,538	96,018	96,617	0,193	96,810
21	90,3	8,09	57,2	520	0,592	0,239	2,477	96,026	96,618	0,193	96,811

$K = 3$ [1]; $p_w = 300$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{hft} [mm]
1	181,0	8,13	76,7	630	0,653	0,269	2,428	95,964	96,617	0,161	96,778
2	149,7	8,15	71,0	628	0,612	0,256	2,391	96,004	96,616	0,162	96,778
3	213,3	8,11	73,1	638	0,658	0,259	2,541	95,961	96,619	0,171	96,790
4	156,0	8,15	77,4	636	0,661	0,262	2,523	95,958	96,619	0,171	96,790
5	158,3	8,15	74,3	608	0,645	0,260	2,481	95,972	96,617	0,159	96,776
8	157,0	8,16	75,2	638	0,654	0,257	2,545	95,964	96,618	0,169	96,787
7	148,7	8,15	74,9	638	0,641	0,257	2,494	95,975	96,616	0,166	96,782
8	223,0	8,09	66,2	584	0,616	0,248	2,484	96,000	96,616	0,186	96,802
9	177,0	8,12	73,9	607	0,654	0,257	2,545	95,962	96,616	0,172	96,788
10	157,0	8,15	71,3	637	0,651	0,250	2,604	95,967	96,618	0,171	96,789
11	204,0	8,17	77,7	611	0,660	0,255	2,588	95,957	96,617	0,153	96,770
12	160,3	8,15	68,9	583	0,631	0,243	2,597	95,986	96,617	0,171	96,788
13	259,0	8,14	68,2	602	0,646	0,242	2,669	95,971	96,617	0,170	96,787
14	195,3	8,13	71,3	614	0,622	0,243	2,560	95,996	96,618	0,171	96,789
15	212,0	8,14	69,3	625	0,619	0,242	2,558	95,996	96,615	0,173	96,788
16	215,7	8,11	67,2	600	0,629	0,235	2,677	95,987	96,616	0,197	96,813
17	264,7	8,13	71,6	604	0,652	0,242	2,694	95,968	96,620	0,175	96,795
18	170,7	8,12	69,7	641	0,654	0,241	2,714	95,961	96,615	0,192	96,807
19	136,1	8,18	70,3	550	0,632	0,237	2,667	95,985	96,617	0,164	96,781
20	143,7	8,14	68,9	584	0,638	0,237	2,692	95,980	96,618	0,173	96,791
21	189,0	8,14	72,3	633	0,635	0,239	2,657	95,983	96,618	0,174	96,792

 $K = 3$ [1]; $p_w = 300$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{hft} [mm]
1	130,4	8,15	63,4	602	0,600	0,221	2,715	96,019	96,619	0,198	96,817
2	92,7	8,15	56,6	585	0,604	0,210	2,876	96,014	96,618	0,189	96,807
3	123,4	8,14	58,9	628	0,603	0,210	2,871	96,015	96,618	0,193	96,811
4	142,4	8,15	58,9	573	0,571	0,210	2,719	96,046	96,617	0,199	96,816
5	96,7	8,14	62,6	575	0,670	0,258	2,597	95,947	96,617	0,193	96,810
6	119,0	8,14	59,4	488	0,601	0,247	2,433	96,015	96,616	0,169	96,785
7	93,7	8,13	63,0	528	0,609	0,251	2,426	96,008	96,617	0,156	96,773
8	116,7	8,16	66,1	651	0,670	0,259	2,587	95,947	96,617	0,155	96,772
9	86,3	8,14	65,5	536	0,620	0,259	2,394	95,998	96,618	0,182	96,800
10	136,7	8,12	64,7	628	0,620	0,248	2,500	95,996	96,616	0,157	96,773
11	113,4	8,12	52,2	449	0,617	0,230	2,683	95,998	96,615	0,191	96,806
12	131,0	8,12	63,1	606	0,663	0,244	2,717	95,957	96,620	0,167	96,787
13	131,4	8,13	65,2	613	0,606	0,251	2,414	96,015	96,621	0,183	96,804
14	131,4	8,14	68,4	648	0,629	0,256	2,457	95,991	96,620	0,166	96,786
15	140,0	8,11	61,4	578	0,622	0,241	2,581	95,995	96,617	0,175	96,792
16	142,7	8,12	62,0	524	0,599	0,251	2,386	96,018	96,617	0,163	96,780
17	121,0	8,13	62,1	493	0,651	0,247	2,636	95,967	96,618	0,176	96,794
18	123,4	8,14	58,9	542	0,625	0,236	2,648	95,995	96,620	0,184	96,804
19	110,4	8,10	54,5	517	0,589	0,224	2,629	96,026	96,615	0,171	96,786
20	183,6	8,10	62,1	584	0,660	0,237	2,785	95,958	96,618	0,173	96,791
21	116,4	8,12	54,4	495	0,652	0,230	2,835	95,963	96,615	0,187	96,802



$K = 3$ [1]; $p_w = 300$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{hft} [mm]
1	100,4	8,12	61,0	544	0,585	0,222	2,635	96,030	96,615	0,192	96,807
2	90,3	8,13	51,3	529	0,566	0,199	2,844	96,049	96,615	0,209	96,824
3	102,0	8,10	59,1	514	0,592	0,252	2,349	96,027	96,619	0,186	96,805
4	103,4	8,10	57,4	517	0,607	0,250	2,428	96,011	96,618	0,186	96,804
5	98,7	8,09	59,3	511	0,615	0,257	2,393	96,000	96,615	0,193	96,808
6	93,7	8,09	50,9	462	0,625	0,237	2,637	95,991	96,616	0,187	96,803
7	97,7	8,09	54,7	505	0,603	0,243	2,481	96,012	96,615	0,183	96,798
8	132,3	8,10	59,2	504	0,605	0,253	2,391	96,010	96,615	0,192	96,807
9	117,6	8,13	59,1	550	0,609	0,248	2,456	96,008	96,617	0,167	96,784
10	100,6	8,11	53,6	473	0,595	0,239	2,490	96,020	96,615	0,190	96,805
11	129,6	8,09	53,5	506	0,608	0,236	2,576	96,008	96,616	0,191	96,807
12	107,4	8,11	54,8	501	0,603	0,225	2,680	96,014	96,617	0,195	96,812
13	106,4	8,12	46,6	439	0,619	0,205	3,020	96,000	96,619	0,200	96,819
14	88,0	8,11	52,6	496	0,597	0,219	2,726	96,021	96,618	0,195	96,813
15	104,0	8,10	53,0	511	0,629	0,221	2,846	95,989	96,618	0,200	96,818
16	103,0	8,11	56,6	515	0,618	0,225	2,747	95,999	96,617	0,194	96,811
17	90,3	8,10	51,6	498	0,606	0,214	2,832	96,010	96,616	0,204	96,820
18	90,3	8,12	58,5	530	0,583	0,227	2,568	96,035	96,618	0,201	96,819
19	128,4	8,11	62,5	520	0,626	0,231	2,710	95,989	96,615	0,202	96,817
20	119,0	8,12	54,8	521	0,596	0,219	2,721	96,022	96,618	0,202	96,820
21	82,0	8,10	53,2	513	0,587	0,214	2,743	96,034	96,621	0,202	96,823

$K = 3$ [1]; $p_w = 300$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{hft} [mm]
1	98,0	8,09	52,0	488	0,651	0,230	2,830	95,970	96,621	0,191	96,812
2	98,3	8,10	54,7	506	0,610	0,232	2,629	96,007	96,617	0,195	96,812
3	74,7	8,09	51,5	483	0,598	0,225	2,658	96,017	96,615	0,197	96,812
4	79,3	8,08	57,6	559	0,612	0,235	2,604	96,003	96,615	0,199	96,814
5	99,7	8,10	55,8	497	0,609	0,233	2,614	96,009	96,618	0,194	96,812
6	75,7	8,09	52,0	471	0,626	0,226	2,770	95,993	96,619	0,201	96,820
7	114,0	8,09	53,7	504	0,599	0,224	2,674	96,019	96,618	0,194	96,812
8	76,0	8,10	53,4	475	0,639	0,229	2,790	95,978	96,617	0,193	96,810
9	88,7	8,09	53,5	506	0,605	0,227	2,665	96,011	96,616	0,194	96,810
10	91,3	8,11	59,0	560	0,612	0,235	2,604	96,003	96,615	0,191	96,806
11	68,3	8,11	53,6	480	0,615	0,220	2,795	96,002	96,617	0,202	96,819
12	127,7	8,14	51,2	535	0,680	0,219	3,105	95,938	96,618	0,198	96,816
13	58,0	8,12	56,2	501	0,621	0,228	2,724	95,998	96,619	0,195	96,814
14	82,0	8,11	53,8	503	0,615	0,219	2,808	96,004	96,619	0,194	96,813
15	66,0	8,10	48,0	472	0,598	0,205	2,917	96,019	96,617	0,200	96,817
16	74,7	8,09	52,1	468	0,606	0,217	2,793	96,011	96,617	0,197	96,814
17	74,3	8,09	49,6	496	0,595	0,210	2,833	96,025	96,620	0,202	96,822
18	91,3	8,09	50,4	467	0,597	0,215	2,777	96,018	96,615	0,205	96,820
19	69,7	8,11	54,2	520	0,609	0,218	2,794	96,009	96,618	0,197	96,815
20	72,3	8,12	53,9	500	0,598	0,217	2,756	96,018	96,616	0,198	96,814
21	64,0	8,09	54,2	564	0,594	0,221	2,688	96,023	96,617	0,201	96,818

$K = 3$ [1]; $p_w = 600$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	221,3	8,13	72,8	632	0,640	0,254	2,520	95,975	96,615	0,161	96,776
2	162,5	8,12	67,4	533	0,619	0,242	2,558	95,998	96,617	0,172	96,789
3	229,3	8,10	74,6	625	0,643	0,253	2,542	95,973	96,616	0,188	96,804
4	202,0	8,16	72,7	614	0,654	0,255	2,565	95,963	96,617	0,164	96,781
5	180,0	8,10	77,0	606	0,674	0,256	2,633	95,945	96,619	0,163	96,782
8	150,0	8,15	70,0	578	0,640	0,244	2,623	95,976	96,616	0,168	96,784
7	152,7	8,13	68,7	565	0,635	0,245	2,592	95,982	96,617	0,167	96,784
8	234,3	8,12	72,0	620	0,645	0,248	2,601	95,973	96,618	0,174	96,792
9	173,7	8,13	73,9	619	0,639	0,252	2,536	95,980	96,619	0,167	96,786
10	208,7	8,08	71,6	623	0,657	0,247	2,660	95,962	96,619	0,193	96,812
11	224,3	8,11	67,7	624	0,619	0,237	2,612	95,996	96,615	0,185	96,800
12	165,7	8,18	73,4	541	0,671	0,259	2,591	95,946	96,617	0,155	96,772
13	180,0	8,19	73,4	542	0,660	0,257	2,568	95,957	96,617	0,151	96,768
14	251,0	8,15	67,2	594	0,652	0,253	2,577	95,963	96,615	0,158	96,773
15	217,7	8,10	70,4	594	0,646	0,249	2,594	95,972	96,618	0,182	96,800
16	173,7	8,15	73,6	600	0,653	0,256	2,551	95,962	96,615	0,168	96,783
17	178,6	8,14	78,5	623	0,650	0,261	2,490	95,966	96,616	0,177	96,793
18	152,3	8,19	74,2	534	0,642	0,254	2,528	95,974	96,616	0,156	96,772
19	244,0	8,15	74,3	620	0,628	0,250	2,512	95,991	96,619	0,162	96,781
20	141,0	8,17	74,3	605	0,652	0,249	2,618	95,965	96,617	0,165	96,782
21	270,0	8,10	78,9	635	0,766	0,268	2,858	95,858	96,624	0,163	96,787

$K = 3$ [1]; $p_w = 600$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	106,4	8,11	58,6	552	0,613	0,227	2,700	96,003	96,616	0,180	96,796
2	124,6	8,14	62,1	622	0,619	0,240	2,579	95,998	96,617	0,184	96,801
3	111,6	8,13	63,1	634	0,608	0,238	2,555	96,009	96,617	0,168	96,785
4	189,4	8,14	62,3	612	0,627	0,238	2,634	95,991	96,618	0,193	96,811
5	157,4	8,17	65,3	602	0,612	0,236	2,593	96,004	96,616	0,184	96,800
6	140,4	8,11	60,3	510	0,621	0,236	2,631	95,997	96,618	0,200	96,818
7	132,3	8,12	54,3	480	0,649	0,222	2,923	95,967	96,616	0,195	96,811
8	105,0	8,11	56,4	534	0,604	0,225	2,684	96,012	96,616	0,183	96,799
9	142,4	8,13	61,7	631	0,600	0,231	2,597	96,017	96,617	0,176	96,793
10	96,0	8,15	56,8	512	0,638	0,225	2,836	95,984	96,622	0,180	96,802
11	112,4	8,17	61,8	506	0,651	0,235	2,770	95,966	96,617	0,182	96,799
12	84,7	8,12	65,5	639	0,609	0,252	2,417	96,009	96,618	0,163	96,781
13	103,6	8,13	56,2	502	0,640	0,237	2,700	95,976	96,616	0,177	96,793
14	108,0	8,14	61,0	578	0,634	0,245	2,588	95,984	96,618	0,156	96,774
15	106,6	8,15	57,9	508	0,614	0,236	2,602	96,007	96,621	0,161	96,782
16	110,6	8,14	64,0	636	0,626	0,252	2,484	95,990	96,616	0,167	96,783
17	116,4	8,10	64,8	525	0,625	0,256	2,441	95,994	96,619	0,184	96,803
18	127,7	8,13	65,4	629	0,613	0,252	2,433	96,003	96,616	0,163	96,779
19	219,8	8,12	59,8	496	0,762	0,251	3,036	95,862	96,624	0,192	96,816
20	141,0	8,14	60,6	570	0,611	0,248	2,464	96,004	96,615	0,178	96,793
21	127,7	8,14	62,2	580	0,610	0,243	2,510	96,009	96,619	0,175	96,794



$K = 3$ [1]; $p_w = 600$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	94,0	8,11	55,9	475	0,603	0,252	2,393	96,012	96,615	0,185	96,800
2	103,6	8,12	61,1	480	0,605	0,269	2,249	96,010	96,615	0,185	96,800
3	98,3	8,09	67,0	552	0,621	0,277	2,242	95,998	96,619	0,190	96,809
4	113,6	8,11	65,4	580	0,618	0,269	2,297	96,001	96,619	0,184	96,803
5	100,0	8,11	64,1	560	0,623	0,273	2,282	95,995	96,618	0,184	96,802
6	106,0	8,10	62,3	514	0,607	0,264	2,299	96,014	96,621	0,187	96,808
7	142,7	8,10	59,2	507	0,588	0,255	2,306	96,028	96,616	0,181	96,797
8	132,0	8,12	63,9	597	0,590	0,261	2,261	96,027	96,617	0,171	96,788
9	146,7	8,12	63,9	558	0,605	0,262	2,309	96,011	96,616	0,193	96,809
10	117,4	8,11	63,5	516	0,593	0,257	2,307	96,022	96,615	0,182	96,797
11	84,0	8,16	57,2	497	0,600	0,242	2,479	96,016	96,616	0,176	96,792
12	75,7	8,11	60,1	539	0,614	0,257	2,389	96,001	96,615	0,183	96,798
13	93,3	8,10	56,7	477	0,597	0,250	2,388	96,018	96,615	0,194	96,809
14	86,0	8,11	56,9	478	0,608	0,248	2,452	96,008	96,616	0,188	96,804
15	108,0	8,12	54,2	471	0,587	0,242	2,426	96,032	96,619	0,192	96,811
16	96,7	8,11	57,3	491	0,605	0,249	2,430	96,013	96,618	0,184	96,802
17	91,0	8,10	57,8	480	0,605	0,246	2,459	96,014	96,619	0,195	96,814
18	110,4	8,11	56,5	480	0,603	0,249	2,422	96,015	96,618	0,183	96,801
19	127,7	8,10	54,1	471	0,591	0,239	2,473	96,028	96,619	0,193	96,812
20	94,0	8,12	55,2	480	0,602	0,240	2,508	96,013	96,615	0,181	96,796
21	94,0	8,09	56,9	499	0,605	0,244	2,480	96,013	96,618	0,191	96,809

$K = 3$ [1]; $p_w = 600$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{h1} [mm]	d_{wft} [mm]	d_{h2} [mm]	d_{h3} [mm]
1	70,0	8,10	56,1	497	0,615	0,238	2,584	96,004	96,619	0,187	96,806
2	95,0	8,11	55,8	513	0,593	0,239	2,481	96,023	96,616	0,191	96,807
3	79,7	8,11	55,4	493	0,680	0,243	2,798	95,936	96,616	0,187	96,803
4	68,3	8,10	52,6	483	0,600	0,231	2,597	96,017	96,617	0,193	96,810
5	66,0	8,10	51,3	461	0,639	0,235	2,719	95,977	96,616	0,191	96,807
6	88,7	8,12	48,5	463	0,647	0,221	2,928	95,970	96,617	0,194	96,811
7	75,3	8,11	54,7	540	0,613	0,233	2,631	96,002	96,615	0,188	96,803
8	86,0	8,08	59,0	552	0,617	0,241	2,560	96,002	96,619	0,193	96,812
9	73,3	8,10	52,5	487	0,605	0,230	2,630	96,010	96,615	0,199	96,814
10	80,7	8,09	54,8	515	0,609	0,230	2,648	96,009	96,618	0,188	96,806
11	75,0	8,11	56,8	525	0,620	0,235	2,638	95,999	96,619	0,193	96,812
12	85,7	8,11	57,2	502	0,617	0,241	2,560	95,998	96,615	0,185	96,800
13	74,0	8,10	59,9	570	0,609	0,245	2,486	96,008	96,617	0,185	96,802
14	68,0	8,12	59,0	548	0,642	0,246	2,610	95,975	96,617	0,176	96,793
15	86,7	8,08	63,5	571	0,600	0,249	2,410	96,017	96,617	0,193	96,810
16	60,0	8,12	55,3	497	0,635	0,238	2,668	95,982	96,617	0,189	96,806
17	74,3	8,11	53,2	495	0,612	0,229	2,672	96,004	96,616	0,187	96,803
18	72,0	8,08	54,6	485	0,604	0,234	2,581	96,015	96,619	0,196	96,815
19	80,3	8,08	60,5	543	0,671	0,244	2,750	95,950	96,621	0,206	96,827
20	77,0	8,11	56,5	558	0,608	0,237	2,565	96,010	96,618	0,185	96,803
21	82,0	8,09	56,6	547	0,605	0,231	2,619	96,012	96,617	0,192	96,809

Příloha 8 – Naměřená data - vliv změny amplitudy A_w

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	231,3	8,15	67,9	377	0,625	0,327	1,911	95,990	96,615	0,146	96,761
2	93,0	8,20	69,6	319	0,626	0,342	1,830	95,989	96,615	0,119	96,734
3	217,3	8,14	68,6	355	0,635	0,332	1,913	95,983	96,618	0,140	96,758
4	167,6	8,16	68,5	359	0,641	0,331	1,937	95,975	96,616	0,140	96,756
5	197,6	8,14	64,5	354	0,618	0,313	1,974	95,997	96,615	0,148	96,763
6	188,0	8,15	69,4	362	0,656	0,333	1,970	95,961	96,617	0,143	96,760
7	180,0	8,14	70,3	354	0,639	0,336	1,902	95,977	96,616	0,141	96,757
8	206,0	8,14	69,8	358	0,630	0,327	1,927	95,987	96,617	0,146	96,763
9	232,0	8,14	71,8	371	0,636	0,331	1,921	95,983	96,619	0,146	96,765
10	175,0	8,14	67,9	358	0,632	0,317	1,994	95,984	96,616	0,142	96,758
11	218,3	8,12	65,7	381	0,641	0,310	2,068	95,975	96,616	0,153	96,769
12	248,3	8,13	83,0	396	0,657	0,386	1,702	95,960	96,617	0,150	96,767
13	195,4	8,14	82,0	377	0,636	0,383	1,661	95,980	96,616	0,145	96,761
14	226,0	8,13	74,4	384	0,653	0,357	1,829	95,963	96,616	0,145	96,761
15	238,0	8,14	67,9	389	0,648	0,339	1,912	95,967	96,615	0,148	96,763
16	260,4	8,15	80,7	384	0,659	0,366	1,801	95,958	96,617	0,156	96,773
17	232,0	8,11	58,0	395	0,573	0,275	2,084	96,044	96,617	0,152	96,769
18	229,3	8,08	65,0	406	0,613	0,301	2,037	96,005	96,618	0,152	96,770
19	239,0	8,09	68,5	423	0,605	0,292	2,072	96,011	96,616	0,157	96,773
20	244,0	8,11	61,5	404	0,625	0,284	2,201	95,993	96,618	0,156	96,774
21	234,8	8,12	68,8	399	0,607	0,298	2,037	96,008	96,615	0,151	96,766

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	121,0	8,15	48,9	291	0,608	0,287	2,118	96,009	96,617	0,152	96,769
2	173,0	8,17	52,0	296	0,622	0,295	2,108	95,995	96,617	0,149	96,766
3	123,4	8,14	47,9	301	0,615	0,280	2,196	96,001	96,616	0,152	96,768
4	115,6	8,14	49,4	289	0,598	0,286	2,091	96,017	96,615	0,163	96,778
5	129,0	8,16	50,8	304	0,622	0,289	2,152	95,994	96,616	0,159	96,775
6	108,4	8,16	48,6	307	0,624	0,280	2,229	95,993	96,617	0,158	96,775
7	122,6	8,14	49,3	315	0,622	0,280	2,221	95,993	96,615	0,143	96,758
8	174,4	8,17	52,9	324	0,613	0,289	2,121	96,003	96,616	0,153	96,769
9	112,6	8,13	50,0	319	0,615	0,283	2,173	96,003	96,618	0,154	96,772
10	133,4	8,12	47,4	305	0,611	0,275	2,222	96,008	96,619	0,160	96,779
11	99,3	8,15	47,3	299	0,650	0,276	2,355	95,967	96,617	0,152	96,769
12	113,0	8,13	60,8	330	0,592	0,306	1,935	96,023	96,615	0,159	96,774
13	110,4	8,13	60,9	358	0,618	0,312	1,981	95,997	96,615	0,155	96,770
14	124,6	8,16	51,8	305	0,636	0,292	2,178	95,979	96,615	0,155	96,770
15	111,6	8,12	50,7	309	0,633	0,285	2,221	95,984	96,617	0,170	96,787
16	96,3	8,15	60,6	364	0,603	0,306	1,971	96,015	96,618	0,158	96,776
17	101,6	8,10	50,2	334	0,586	0,253	2,316	96,031	96,617	0,169	96,786
18	100,0	8,10	52,3	368	0,600	0,259	2,317	96,017	96,617	0,166	96,783
19	96,0	8,12	44,7	314	0,599	0,252	2,377	96,017	96,616	0,170	96,786
20	100,5	8,10	44,3	321	0,595	0,246	2,419	96,022	96,617	0,174	96,791
21	99,7	8,11	43,2	320	0,601	0,248	2,423	96,014	96,615	0,169	96,784

$K=3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	118,0	8,14	44,9	298	0,589	0,274	2,150	96,026	96,615	0,154	96,769
2	114,4	8,14	48,6	306	0,612	0,290	2,110	96,003	96,615	0,155	96,770
3	99,7	8,13	51,6	311	0,615	0,292	2,106	96,003	96,618	0,169	96,787
4	101,6	8,13	44,8	293	0,613	0,271	2,262	96,002	96,615	0,163	96,778
5	84,3	8,16	50,5	321	0,618	0,284	2,176	95,998	96,616	0,155	96,771
6	111,6	8,14	47,8	302	0,607	0,275	2,207	96,008	96,615	0,164	96,779
7	110,6	8,14	47,1	305	0,602	0,279	2,158	96,014	96,616	0,158	96,774
8	98,3	8,13	45,5	305	0,609	0,271	2,247	96,007	96,616	0,161	96,777
9	92,7	8,14	45,5	308	0,614	0,271	2,266	96,003	96,617	0,160	96,777
10	83,7	8,14	49,8	314	0,601	0,277	2,170	96,015	96,616	0,168	96,784
11	87,7	8,18	47,9	304	0,604	0,271	2,229	96,013	96,617	0,153	96,770
12	88,0	8,13	56,1	345	0,589	0,284	2,074	96,026	96,615	0,163	96,778
13	84,0	8,11	51,5	321	0,601	0,268	2,243	96,016	96,617	0,188	96,805
14	84,7	8,15	52,0	345	0,600	0,271	2,214	96,017	96,617	0,168	96,785
15	101,4	8,15	49,8	337	0,600	0,270	2,222	96,017	96,617	0,170	96,787
16	92,0	8,13	45,0	305	0,594	0,257	2,311	96,021	96,615	0,170	96,785
17	95,7	8,12	45,1	338	0,583	0,234	2,491	96,034	96,617	0,170	96,787
18	104,4	8,12	45,7	345	0,570	0,237	2,405	96,047	96,617	0,169	96,786
19	95,3	8,12	47,0	365	0,571	0,238	2,399	96,046	96,617	0,176	96,793
20	82,0	8,13	46,1	362	0,569	0,235	2,421	96,047	96,616	0,170	96,786
21	79,0	8,12	46,8	355	0,579	0,235	2,464	96,038	96,617	0,173	96,790

 $K=3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	100,6	8,13	48,8	297	0,604	0,292	2,068	96,012	96,616	0,153	96,769
2	83,3	8,15	46,4	310	0,618	0,280	2,207	95,999	96,617	0,152	96,769
3	68,7	8,13	50,9	310	0,594	0,298	1,993	96,022	96,616	0,152	96,768
4	97,7	8,15	46,9	300	0,605	0,282	2,145	96,011	96,616	0,158	96,774
5	114,4	8,13	47,2	307	0,621	0,281	2,210	95,994	96,615	0,155	96,770
6	74,3	8,15	45,3	299	0,597	0,274	2,179	96,019	96,616	0,158	96,774
7	71,0	8,13	52,1	329	0,597	0,293	2,038	96,018	96,615	0,153	96,768
8	74,0	8,11	48,1	299	0,601	0,285	2,109	96,016	96,617	0,171	96,788
9	81,3	8,12	47,6	307	0,607	0,284	2,137	96,008	96,615	0,163	96,778
10	97,7	8,17	49,8	316	0,612	0,284	2,155	96,005	96,617	0,162	96,779
11	84,0	8,13	47,9	323	0,604	0,273	2,212	96,012	96,616	0,159	96,775
12	81,3	8,14	47,2	341	0,584	0,250	2,336	96,031	96,615	0,177	96,792
13	102,3	8,12	48,3	346	0,602	0,248	2,427	96,019	96,621	0,174	96,795
14	88,7	8,11	47,7	336	0,602	0,246	2,447	96,013	96,615	0,171	96,786
15	81,3	8,13	49,0	338	0,587	0,248	2,367	96,030	96,617	0,176	96,793
16	83,0	8,12	36,4	302	0,592	0,223	2,655	96,025	96,617	0,183	96,800
17	80,0	8,13	46,4	376	0,570	0,227	2,511	96,047	96,617	0,175	96,792
18	59,0	8,14	46,1	369	0,579	0,234	2,474	96,036	96,615	0,174	96,789
19	63,0	8,11	47,8	363	0,577	0,234	2,466	96,038	96,615	0,161	96,776
20	82,7	8,14	45,0	381	0,587	0,222	2,644	96,029	96,616	0,173	96,789
21	74,0	8,17	47,0	379	0,566	0,228	2,482	96,052	96,618	0,166	96,784

$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	244,0	8,06	201,2	184	0,652	1,507	0,433	95,965	96,617	0,211	96,828
2	157,7	8,05	208,0	187	0,662	1,505	0,440	95,953	96,615	0,218	96,833
3	312,8	8,09	116,4	197	0,663	0,923	0,718	95,952	96,615	0,180	96,795
4	211,3	8,06	214,6	214	0,662	1,522	0,435	95,953	96,615	0,199	96,814
5	322,3	8,11	106,2	190	0,659	0,883	0,746	95,956	96,615	0,155	96,770
6	278,8	8,14	124,9	212	0,655	1,034	0,633	95,960	96,615	0,149	96,764
7	310,0	8,13	110,5	230	0,645	0,890	0,725	95,971	96,616	0,148	96,764
8	243,7	8,08	196,5	188	0,664	1,405	0,473	95,952	96,616	0,202	96,818
9	190,3	8,09	196,1	224	0,643	1,354	0,475	95,972	96,615	0,205	96,820
10	206,3	8,09	191,0	215	0,628	1,331	0,472	95,987	96,615	0,201	96,816
11	266,0	8,08	113,5	223	0,625	0,768	0,814	95,990	96,615	0,200	96,815
12	333,0	8,10	160,7	220	0,636	1,023	0,622	95,979	96,615	0,198	96,813
13	274,3	8,12	150,8	211	0,632	0,948	0,667	95,983	96,615	0,194	96,809
14	363,3	8,10	163,6	168	0,660	1,507	0,438	95,955	96,615	0,163	96,778
15	340,3	8,11	162,2	169	0,660	1,508	0,438	95,955	96,615	0,156	96,771
16	384,4	8,07	182,7	183	0,673	1,591	0,423	95,942	96,615	0,196	96,811
17	296,8	8,03	210,1	193	0,595	1,395	0,427	96,020	96,615	0,207	96,822
18	237,8	8,10	129,6	204	0,608	0,906	0,671	96,009	96,617	0,152	96,769
19	194,6	8,09	141,6	223	0,598	0,927	0,645	96,018	96,616	0,172	96,788
20	144,3	8,03	198,6	193	0,585	1,343	0,436	96,030	96,615	0,210	96,825
21	162,6	8,03	191,9	225	0,594	1,249	0,476	96,021	96,615	0,204	96,819

$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	113,0	8,07	181,1	182	0,585	1,190	0,492	96,030	96,615	0,213	96,828
2	100,7	8,08	195,9	189	0,580	1,274	0,455	96,035	96,615	0,201	96,816
3	2,7	8,09	204,7	198	0,596	1,323	0,450	96,019	96,615	0,209	96,824
4	80,0	8,07	187,0	183	0,596	1,232	0,484	96,019	96,615	0,202	96,817
5	102,3	8,07	190,5	185	0,591	1,236	0,478	96,024	96,615	0,201	96,816
6	153,7	8,09	150,5	178	0,626	1,060	0,591	95,989	96,615	0,190	96,805
7	105,0	8,08	186,3	189	0,589	1,188	0,496	96,026	96,615	0,205	96,820
8	135,0	8,10	140,0	172	0,576	0,967	0,596	96,039	96,615	0,176	96,791
9	151,3	8,10	143,9	176	0,607	1,006	0,603	96,008	96,615	0,178	96,793
10	0,0	8,09	157,0	182	0,599	1,053	0,569	96,016	96,615	0,180	96,795
11	6,6	8,08	188,9	198	0,626	1,201	0,521	95,989	96,615	0,201	96,816
12	62,7	8,08	179,4	203	0,597	1,111	0,537	96,018	96,615	0,200	96,815
13	112,7	8,09	170,4	202	0,618	1,113	0,555	95,997	96,615	0,200	96,815
14	0,0	8,09	159,2	198	0,590	1,064	0,555	96,025	96,615	0,189	96,804
15	0,0	8,11	159,7	210	0,605	1,029	0,588	96,010	96,615	0,176	96,791
16	167,4	8,10	100,6	181	0,583	0,795	0,733	96,032	96,615	0,179	96,794
17	46,7	8,10	181,8	215	0,578	1,142	0,506	96,037	96,615	0,184	96,799
18	108,4	8,08	155,7	198	0,584	1,042	0,560	96,031	96,615	0,178	96,793
19	39,7	8,10	181,9	228	0,578	1,158	0,499	96,037	96,615	0,177	96,792
20	109,4	8,10	138,5	200	0,590	0,949	0,622	96,025	96,615	0,182	96,797
21	116,6	8,08	139,4	213	0,575	0,923	0,623	96,040	96,615	0,185	96,800



$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	137,0	8,08	211,4	168	0,596	1,762	0,338	96,020	96,616	0,211	96,827
2	100,3	8,05	254,3	162	0,580	2,061	0,281	96,035	96,615	0,226	96,841
3	26,7	8,02	275,3	165	0,631	2,270	0,278	95,985	96,616	0,248	96,864
4	196,0	8,10	105,2	163	0,609	0,990	0,615	96,006	96,615	0,181	96,796
5	182,3	8,12	132,0	169	0,597	1,142	0,523	96,018	96,615	0,163	96,778
6	38,7	8,02	271,6	172	0,607	2,121	0,286	96,008	96,615	0,249	96,864
7	167,7	8,10	139,7	167	0,663	1,225	0,541	95,952	96,615	0,165	96,780
8	152,0	8,08	222,3	164	0,594	1,698	0,350	96,021	96,615	0,210	96,825
9	7,6	8,10	239,5	172	0,595	1,826	0,326	96,020	96,615	0,200	96,815
10	0,0	8,10	250,3	168	0,591	1,866	0,317	96,024	96,615	0,202	96,817
11	48,7	8,12	216,2	179	0,602	1,617	0,372	96,013	96,615	0,191	96,806
12	25,7	8,11	238,0	171	0,602	1,726	0,349	96,013	96,615	0,198	96,813
13	34,0	8,12	213,3	179	0,586	1,583	0,370	96,029	96,615	0,192	96,807
14	0,0	8,10	224,2	179	0,600	1,602	0,375	96,015	96,615	0,187	96,802
15	0,0	8,08	231,9	183	0,602	1,632	0,369	96,013	96,615	0,208	96,823
16	113,4	8,11	82,4	202	0,569	0,612	0,930	96,046	96,615	0,175	96,790
17	167,0	8,10	69,5	232	0,559	0,524	1,067	96,056	96,615	0,184	96,799
18	158,4	8,09	72,1	243	0,554	0,532	1,041	96,061	96,615	0,183	96,798
19	160,4	8,10	93,9	244	0,557	0,663	0,840	96,058	96,615	0,181	96,796
20	140,7	8,08	73,3	205	0,553	0,534	1,036	96,062	96,615	0,192	96,807
21	146,4	8,10	80,9	204	0,561	0,569	0,986	96,054	96,615	0,184	96,799

$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	98,3	8,12	119,3	181	0,582	0,940	0,619	96,033	96,615	0,169	96,784
2	52,0	8,08	181,7	173	0,595	1,370	0,434	96,020	96,615	0,178	96,793
3	0,0	8,12	191,7	181	0,587	1,374	0,427	96,028	96,615	0,185	96,800
4	35,2	8,09	155,3	179	0,640	1,203	0,532	95,975	96,615	0,181	96,796
5	0,0	8,12	190,6	190	0,594	1,380	0,430	96,021	96,615	0,192	96,807
6	60,7	8,11	157,3	179	0,579	1,139	0,508	96,036	96,615	0,176	96,791
7	23,0	8,12	180,1	197	0,574	1,243	0,462	96,041	96,615	0,179	96,794
8	39,7	8,12	172,3	202	0,584	1,233	0,474	96,031	96,615	0,177	96,792
9	58,7	8,11	158,3	184	0,573	1,141	0,502	96,042	96,615	0,178	96,793
10	41,3	8,11	153,3	180	0,577	1,119	0,516	96,038	96,615	0,182	96,797
11	43,7	8,11	173,5	186	0,576	1,194	0,482	96,039	96,615	0,188	96,803
12	32,0	8,12	132,0	187	0,574	1,005	0,571	96,041	96,615	0,180	96,795
13	63,3	8,12	152,9	180	0,584	1,102	0,530	96,031	96,615	0,178	96,793
14	40,3	8,13	141,6	198	0,578	1,031	0,561	96,037	96,615	0,180	96,795
15	33,0	8,11	135,2	226	0,578	0,980	0,590	96,037	96,615	0,179	96,794
16	156,4	8,07	113,4	177	0,600	1,048	0,573	96,015	96,615	0,184	96,799
17	154,0	8,11	116,6	182	0,593	1,012	0,586	96,022	96,615	0,159	96,774
18	154,0	8,11	110,6	173	0,586	0,988	0,593	96,030	96,616	0,160	96,776
19	180,0	8,10	105,3	185	0,577	0,958	0,602	96,038	96,615	0,186	96,801
20	176,0	8,09	106,3	181	0,593	0,952	0,623	96,022	96,615	0,186	96,801
21	181,0	8,08	102,7	181	0,594	0,919	0,646	96,021	96,615	0,181	96,796



$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	347,6	8,11	184,3	212	0,593	1,667	0,356	96,023	96,616	0,155	96,771
2	334,0	8,11	198,8	218	0,598	1,768	0,338	96,017	96,615	0,155	96,770
3	346,8	8,11	211,1	189	0,596	1,748	0,341	96,020	96,616	0,157	96,773
4	351,2	8,10	185,3	215	0,584	1,605	0,364	96,031	96,615	0,162	96,777
5	346,8	8,11	190,1	197	0,592	1,640	0,361	96,023	96,615	0,158	96,773
6	332,8	8,11	234,1	182	0,602	2,007	0,300	96,013	96,615	0,154	96,769
7	291,2	8,10	195,9	190	0,599	1,641	0,365	96,017	96,616	0,156	96,772
8	313,6	8,10	202,2	181	0,605	1,728	0,350	96,010	96,615	0,159	96,774
9	292,8	8,09	212,6	206	0,593	1,737	0,341	96,022	96,615	0,179	96,794
10	206,0	8,07	224,4	210	0,591	1,723	0,343	96,024	96,615	0,195	96,810
11	316,4	8,12	181,4	217	0,592	1,525	0,388	96,023	96,615	0,155	96,770
12	260,8	8,10	221,8	198	0,596	1,731	0,344	96,019	96,615	0,178	96,793
13	275,6	8,08	200,6	184	0,590	1,588	0,372	96,025	96,615	0,187	96,802
14	343,2	8,10	195,2	196	0,592	1,620	0,365	96,023	96,615	0,166	96,781
15	287,6	8,11	186,8	215	0,576	1,483	0,388	96,040	96,616	0,163	96,779
16	292,8	8,11	180,4	237	0,574	1,447	0,397	96,042	96,616	0,158	96,774
17	292,8	8,10	213,3	199	0,583	1,677	0,348	96,032	96,615	0,172	96,787
18	272,4	8,09	199,4	241	0,588	1,499	0,392	96,027	96,615	0,181	96,796
19	313,6	8,11	176,9	208	0,591	1,417	0,417	96,025	96,616	0,160	96,776
20	332,0	8,10	222,9	235	0,606	1,725	0,351	96,009	96,615	0,171	96,786
21	297,3	8,10	189,7	231	0,577	1,511	0,382	96,038	96,615	0,171	96,786

$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wft} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	250,4	8,08	131,4	183	0,568	1,041	0,591	96,047	96,615	0,198	96,813
2	30,7	8,07	261,7	179	0,570	1,877	1,070	96,045	96,615	0,211	96,826
3	211,3	8,03	237,3	184	0,569	1,688	0,960	96,046	96,615	0,228	96,843
4	243,3	8,08	144,8	183	0,577	1,125	0,649	96,038	96,615	0,198	96,813
5	87,0	8,05	242,6	175	0,570	1,744	0,994	96,045	96,615	0,213	96,828
6	24,3	8,08	246,6	178	0,569	1,778	1,012	96,046	96,615	0,211	96,826
7	88,3	8,05	232,2	191	0,572	1,677	0,959	96,043	96,615	0,205	96,820
8	34,7	8,09	237,9	191	0,548	1,683	0,922	96,067	96,615	0,191	96,806
9	87,7	8,08	251,6	187	0,581	1,766	1,026	96,034	96,615	0,213	96,828
10	66,7	8,06	248,6	186	0,583	1,764	1,028	96,032	96,615	0,213	96,828
11	167,4	8,09	202,7	188	0,577	1,464	0,845	96,038	96,615	0,182	96,797
12	191,4	8,08	223,7	184	0,569	1,537	0,875	96,046	96,615	0,218	96,833
13	115,6	8,04	236,8	177	0,564	1,624	0,916	96,051	96,615	0,219	96,834
14	0,0	8,06	237,3	187	0,558	1,624	0,906	96,057	96,615	0,213	96,828
15	56,3	8,06	227,8	183	0,582	1,569	0,913	96,033	96,615	0,208	96,823
16	209,3	8,09	172,2	194	0,568	1,309	0,744	96,047	96,615	0,183	96,798
17	0,0	8,06	248,4	206	0,572	1,694	0,969	96,043	96,615	0,205	96,820
18	72,7	8,08	187,5	191	0,567	1,413	0,801	96,048	96,615	0,197	96,812
19	157,4	8,08	154,8	189	0,557	1,218	0,678	96,058	96,615	0,183	96,798
20	98,3	8,08	208,8	196	0,573	1,472	0,843	96,042	96,615	0,207	96,822
21	63,3	8,07	216,4	202	0,566	1,471	0,833	96,049	96,615	0,204	96,819



$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	219,3	8,08	208,6	188	0,577	1,709	0,338	96,038	96,615	0,210	96,825
2	224,3	8,06	214,2	175	0,587	1,767	0,332	96,028	96,615	0,204	96,819
3	198,4	8,06	207,1	182	0,573	1,686	0,340	96,042	96,615	0,216	96,831
4	212,8	8,05	212,2	184	0,582	1,721	0,338	96,033	96,615	0,212	96,827
5	198,6	8,04	197,1	192	0,562	1,633	0,344	96,053	96,615	0,200	96,815
6	182,4	8,05	184,2	179	0,592	1,626	0,364	96,023	96,615	0,212	96,827
7	222,0	8,05	174,0	177	0,599	1,568	0,382	96,016	96,615	0,204	96,819
8	260,4	8,06	204,6	176	0,589	1,670	0,353	96,026	96,615	0,212	96,827
9	226,0	8,06	182,1	184	0,583	1,560	0,374	96,032	96,615	0,204	96,819
10	66,7	8,03	269,9	179	0,591	2,134	0,277	96,024	96,615	0,191	96,806
11	215,8	8,02	187,0	180	0,582	1,557	0,374	96,033	96,615	0,212	96,827
12	225,0	8,05	182,3	194	0,576	1,506	0,382	96,039	96,615	0,210	96,825
13	204,3	8,06	163,2	185	0,582	1,446	0,402	96,033	96,615	0,203	96,818
14	204,8	8,05	181,5	186	0,572	1,484	0,385	96,043	96,615	0,218	96,833
15	163,4	8,07	175,0	187	0,576	1,494	0,386	96,039	96,615	0,189	96,804
16	190,0	8,06	188,8	172	0,585	1,542	0,379	96,030	96,615	0,212	96,827
17	252,0	8,06	185,5	176	0,583	1,503	0,388	96,032	96,615	0,208	96,823
18	239,0	8,05	188,0	175	0,585	1,494	0,392	96,030	96,615	0,210	96,825
19	80,7	8,06	218,4	201	0,583	1,749	0,333	96,034	96,617	0,205	96,822
20	98,3	8,09	198,5	189	0,597	1,670	0,357	96,018	96,615	0,179	96,794
21	182,6	8,09	139,8	174	0,546	1,283	0,426	96,069	96,615	0,168	96,783

$K = 9 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_h [mm]	d_{hf} [mm]
1	144,6	8,11	126,3	202	0,577	1,103	0,523	96,038	96,615	0,171	96,786
2	80,7	8,07	154,7	207	0,556	1,302	0,427	96,059	96,615	0,183	96,798
3	138,0	8,07	98,8	199	0,571	0,800	0,714	96,044	96,615	0,189	96,804
4	110,4	8,06	118,2	210	0,579	0,965	0,600	96,036	96,615	0,171	96,786
5	124,6	8,07	151,7	217	0,564	1,329	0,424	96,051	96,615	0,185	96,800
6	137,4	8,09	96,9	227	0,554	0,796	0,696	96,062	96,616	0,176	96,792
7	97,7	8,06	141,0	218	0,570	1,146	0,497	96,045	96,615	0,175	96,790
8	104,6	8,09	176,6	194	0,570	1,357	0,420	96,045	96,615	0,184	96,799
9	171,4	8,08	89,6	222	0,565	0,748	0,755	96,050	96,615	0,193	96,808
10	79,7	8,09	104,0	231	0,559	0,802	0,697	96,056	96,615	0,174	96,789
11	155,6	8,07	85,4	196	0,560	0,719	0,779	96,055	96,615	0,191	96,806
12	160,0	8,06	92,9	182	0,573	0,756	0,758	96,042	96,615	0,195	96,810
13	118,4	8,06	124,6	219	0,550	0,961	0,572	96,065	96,615	0,183	96,798
14	144,6	8,07	91,8	228	0,571	0,762	0,749	96,044	96,615	0,189	96,804
15	226,8	8,06	262,5	179	0,612	2,451	0,250	96,003	96,615	0,197	96,812
16	199,4	8,05	261,6	173	0,583	2,431	0,240	96,032	96,615	0,205	96,820
17	201,8	8,04	218,4	183	0,579	2,072	0,279	96,036	96,615	0,197	96,812
18	236,8	8,04	228,1	178	0,588	2,112	0,278	96,027	96,615	0,191	96,806
19	226,3	8,04	276,9	185	0,607	2,367	0,256	96,008	96,615	0,215	96,830
20	226,1	8,04	224,4	175	0,593	2,068	0,287	96,022	96,615	0,192	96,807
21	202,3	8,05	215,6	180	0,590	2,048	0,288	96,025	96,615	0,192	96,807

Příloha 9 – Naměřená data - při vyšším K a p_w

$K = 20$ [1]; $p_w = 60$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 0%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	486,5	8,06	583,0	334	0,598	3,744	0,160	96,017	96,615	0,108	96,723
2	528,8	8,06	565,1	294	0,596	3,589	0,166	96,019	96,615	0,106	96,721
3	297,2	8,05	998,7	281	0,601	5,768	0,104	96,014	96,615	0,132	96,747
4	478,0	8,02	783,9	281	0,599	4,495	0,133	96,016	96,615	0,129	96,744
5	392,8	8,04	759,1	305	0,587	4,409	0,133	96,028	96,615	0,122	96,737
6	561,8	8,00	876,9	304	0,600	6,066	0,099	96,015	96,615	0,101	96,716
7	764,0	8,01	1268,4	260	0,647	9,059	0,071	95,968	96,615	0,125	96,740
8	532,5	8,09	1036,0	314	0,635	7,683	0,083	95,980	96,615	0,099	96,714
9	606,0	8,05	1043,6	299	0,632	7,687	0,082	95,983	96,615	0,099	96,714
10	493,5	8,08	1023,0	275	0,611	7,427	0,082	96,004	96,615	0,100	96,715
11	554,3	8,08	1001,8	291	0,624	7,582	0,082	95,991	96,615	0,100	96,715
12	544,5	8,08	1108,2	288	0,653	7,609	0,086	95,962	96,615	0,102	96,717
13	628,5	8,06	911,4	285	0,608	6,234	0,098	96,007	96,615	0,110	96,725
14	820,0	8,03	1087,9	302	0,613	7,061	0,087	96,002	96,615	0,118	96,733
15	798,4	8,04	993,1	296	0,619	6,675	0,093	95,996	96,615	0,125	96,740
16	612,8	8,09	1091,3	301	0,633	7,468	0,085	95,985	96,618	0,102	96,720
17	377,6	8,04	1912,8	342	0,613	9,758	0,063	96,002	96,615	0,123	96,738
18	873,0	8,06	1812,8	358	0,584	9,699	0,060	96,031	96,615	0,102	96,717
19	544,0	8,02	1713,8	337	0,601	9,178	0,065	96,014	96,615	0,108	96,723
20	127,1	8,02	1710,0	347	0,593	8,595	0,069	96,022	96,615	0,097	96,712
21	750,0	8,02	1825,4	374	0,607	9,854	0,062	96,008	96,615	0,105	96,720

$K = 20$ [1]; $p_w = 60$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 2%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	307,2	8,06	983,6	257	0,624	7,563	0,083	95,992	96,616	0,114	96,730
2	322,8	8,06	877,9	271	0,603	6,311	0,096	96,012	96,615	0,110	96,725
3	333,2	8,08	924,4	289	0,621	6,942	0,089	95,994	96,615	0,105	96,720
4	299,2	8,06	863,3	269	0,616	6,459	0,095	96,000	96,616	0,104	96,720
5	304,8	8,06	884,2	271	0,618	6,478	0,095	95,997	96,615	0,108	96,723
6	313,2	8,08	867,9	270	0,588	6,436	0,091	96,027	96,615	0,112	96,727
7	303,6	8,06	896,7	272	0,610	6,524	0,094	96,005	96,615	0,108	96,723
8	309,6	8,07	973,8	265	0,642	7,319	0,088	95,973	96,615	0,112	96,727
9	325,6	8,06	882,1	268	0,634	6,368	0,100	95,981	96,615	0,108	96,723
10	301,2	8,07	731,4	271	0,604	5,402	0,112	96,011	96,615	0,110	96,725
11	318,0	8,06	864,2	284	0,610	6,019	0,101	96,005	96,615	0,118	96,733
12	336,8	8,08	855,9	288	0,593	5,862	0,101	96,022	96,615	0,115	96,730
13	329,2	8,07	853,6	270	0,635	6,106	0,104	95,980	96,615	0,115	96,730
14	326,8	8,07	770,4	278	0,593	5,449	0,109	96,022	96,615	0,112	96,727
15	260,8	8,06	850,6	286	0,590	5,911	0,100	96,025	96,615	0,114	96,729
16	320,8	8,06	1266,9	343	0,575	7,352	0,078	96,040	96,615	0,096	96,711
17	282,0	8,03	1453,7	340	0,599	8,471	0,071	96,016	96,615	0,096	96,711
18	330,8	8,01	1507,5	436	0,613	8,603	0,071	96,002	96,615	0,095	96,710
19	320,4	8,02	1489,4	343	0,601	8,503	0,071	96,014	96,615	0,100	96,715
20	403,5	8,02	1523,0	340	0,615	8,811	0,070	96,000	96,615	0,100	96,715
21	348,8	8,04	1469,4	347	0,599	8,377	0,072	96,016	96,615	0,098	96,713

$K = 20$ [1]; $p_w = 60$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 4%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	203,3	8,06	853,2	279	0,621	6,115	0,102	95,994	96,615	0,103	96,718
2	271,6	8,05	827,6	264	0,612	6,094	0,100	96,003	96,615	0,113	96,728
3	266,4	8,05	761,1	285	0,613	5,445	0,113	96,002	96,615	0,108	96,723
4	279,2	8,06	797,7	269	0,605	5,819	0,104	96,011	96,616	0,109	96,725
5	313,2	8,05	858,7	259	0,601	6,061	0,099	96,014	96,615	0,114	96,729
6	231,0	8,05	810,0	275	0,607	5,934	0,102	96,008	96,615	0,108	96,723
7	246,0	8,07	786,5	280	0,641	5,767	0,111	95,974	96,615	0,104	96,719
8	180,4	8,06	626,7	301	0,600	4,397	0,136	96,016	96,616	0,101	96,717
9	251,2	8,06	723,7	285	0,602	4,934	0,122	96,013	96,615	0,104	96,719
10	263,2	8,06	438,9	289	0,594	3,005	0,198	96,021	96,615	0,095	96,710
11	274,4	8,06	569,9	270	0,594	3,959	0,150	96,021	96,615	0,104	96,719
12	157,4	8,07	553,0	308	0,583	3,805	0,153	96,032	96,615	0,100	96,715
13	221,3	8,08	628,8	309	0,592	4,586	0,129	96,023	96,615	0,094	96,709
14	227,0	8,08	317,4	307	0,592	2,081	0,284	96,023	96,615	0,091	96,706
15	173,6	8,06	945,0	306	0,588	6,243	0,094	96,027	96,615	0,099	96,714
16	241,8	8,00	1441,5	336	0,590	8,156	0,072	96,025	96,615	0,110	96,725
17	320,8	8,03	1501,3	351	0,602	8,527	0,071	96,013	96,615	0,102	96,717
18	248,0	8,02	1497,4	326	0,599	8,278	0,072	96,016	96,615	0,107	96,722
19	300,4	8,03	1435,2	365	0,610	8,228	0,074	96,005	96,615	0,100	96,715
20	277,2	8,04	1492,8	323	0,605	8,199	0,074	96,010	96,615	0,105	96,720
21	300,4	8,04	1292,8	339	0,585	7,178	0,081	96,030	96,615	0,100	96,715

$K = 20$ [1]; $p_w = 60$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm; 6%

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	193,6	8,07	389,6	309	0,574	2,592	0,221	96,041	96,615	0,094	96,709
2	155,6	8,06	310,3	288	0,578	2,042	0,283	96,037	96,615	0,095	96,710
3	119,4	8,06	850,6	324	0,573	5,573	0,103	96,042	96,615	0,105	96,720
4	249,3	8,05	549,5	292	0,577	3,510	0,164	96,039	96,616	0,118	96,734
5	237,3	8,03	639,4	287	0,565	4,047	0,140	96,050	96,615	0,123	96,738
6	248,0	8,03	572,0	276	0,579	3,628	0,160	96,036	96,615	0,124	96,739
7	227,8	8,04	501,8	331	0,569	3,109	0,183	96,049	96,618	0,122	96,740
8	247,3	8,05	543,8	268	0,585	3,550	0,165	96,030	96,615	0,119	96,734
9	276,8	8,03	515,5	292	0,571	3,184	0,179	96,046	96,617	0,131	96,748
10	133,1	8,10	301,0	283	0,557	2,022	0,275	96,058	96,615	0,075	96,690
11	183,6	8,03	948,8	328	0,594	6,197	0,096	96,021	96,615	0,128	96,743
12	120,6	8,09	711,8	321	0,569	4,863	0,117	96,046	96,615	0,088	96,703
13	134,7	8,05	879,6	304	0,555	5,725	0,097	96,060	96,615	0,117	96,732
14	223,0	8,06	312,0	296	0,585	1,937	0,302	96,030	96,615	0,093	96,708
15	220,3	8,07	428,8	284	0,593	2,716	0,218	96,022	96,615	0,093	96,708
16	299,6	8,03	1320,6	359	0,610	7,318	0,083	96,005	96,615	0,096	96,711
17	231,8	8,05	1620,2	362	0,591	8,209	0,072	96,024	96,615	0,110	96,725
18	186,0	7,99	1629,2	339	0,594	8,074	0,074	96,021	96,615	0,120	96,735
19	231,8	8,03	837,7	336	0,595	4,451	0,134	96,020	96,615	0,076	96,691
20	241,8	8,00	1371,9	341	0,597	7,180	0,083	96,018	96,615	0,099	96,714
21	236,8	8,03	1035,7	341	0,599	5,436	0,110	96,016	96,615	0,085	96,700



Příloha 10 - Naměřená data - vliv změny délky tělíska 1

$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 0%; krátké tělísko

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_1 [mm]	d_{wf} [mm]	d_2 [mm]	d_{ef} [mm]
1	232,3	8,07	60,4	435	0,643	0,240	2,679	95,976	96,619	0,213	96,832
2	316,4	8,06	59,4	443	0,649	0,233	2,785	95,979	96,628	0,222	96,850
3	284,8	8,07	55,1	450	0,633	0,221	2,864	95,986	96,619	0,218	96,837
4	290,0	8,07	57,2	433	0,652	0,223	2,924	95,988	96,640	0,198	96,838
5	338,8	8,07	61,0	446	0,664	0,235	2,826	95,961	96,625	0,210	96,835
6	255,6	8,07	60,9	469	0,635	0,233	2,725	95,984	96,619	0,222	96,841
7	300,0	8,07	53,5	467	0,641	0,214	2,995	95,978	96,619	0,217	96,836
8	274,0	8,08	51,6	454	0,626	0,204	3,069	95,997	96,623	0,206	96,829
9	304,8	8,08	57,6	434	0,626	0,221	2,833	95,989	96,615	0,217	96,832
10	309,2	8,09	71,9	341	0,654	0,326	2,006	95,962	96,616	0,191	96,807
11	325,2	8,07	73,1	351	0,648	0,334	1,940	95,969	96,617	0,204	96,821
12	328,0	8,07	74,1	356	0,656	0,327	2,006	95,960	96,616	0,204	96,820
13	334,0	8,06	72,6	346	0,660	0,321	2,056	95,969	96,629	0,205	96,834
14	355,6	8,05	78,2	361	0,662	0,340	1,947	95,958	96,620	0,211	96,831
15	313,6	8,07	70,6	358	0,658	0,316	2,082	95,962	96,620	0,190	96,810
16	374,4	8,04	75,3	348	0,678	0,337	2,012	95,958	96,636	0,204	96,840
17	289,2	8,09	62,3	388	0,643	0,261	2,464	95,981	96,624	0,180	96,804
18	325,2	8,06	64,4	385	0,661	0,270	2,448	95,970	96,631	0,207	96,838
19	327,6	8,08	57,6	389	0,666	0,248	2,685	95,952	96,618	0,203	96,821
20	361,6	8,05	61,1	396	0,648	0,255	2,541	95,978	96,626	0,219	96,845
21	384,8	8,06	66,6	396	0,648	0,269	2,409	95,967	96,615	0,223	96,838

Příloha 11 – Naměřená data – vliv změny vůle uložení pro tělísko 1

$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 0 %; vůle 0,1 mm

vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	189,0	8,12	83,5	422	0,647	0,303	2,135	95,971	96,618	0,176	96,794
2	270,0	8,08	86,2	444	0,637	0,308	2,068	95,978	96,615	0,214	96,829
3	227,7	8,11	87,4	442	0,632	0,314	2,013	95,985	96,617	0,184	96,801
4	238,0	8,12	91,9	499	0,633	0,319	1,984	95,985	96,618	0,180	96,798
5	200,3	8,10	85,1	456	0,636	0,301	2,113	95,984	96,620	0,188	96,808
6	268,0	8,11	86,5	498	0,640	0,301	2,126	95,976	96,616	0,203	96,819
7	264,0	8,12	87,3	454	0,629	0,306	2,056	95,987	96,616	0,186	96,802
8	237,3	8,10	83,3	493	0,655	0,294	2,228	95,970	96,625	0,187	96,812
9	261,7	8,12	89,2	491	0,645	0,308	2,094	95,970	96,615	0,188	96,803
10	255,7	8,12	86,6	503	0,629	0,298	2,111	95,987	96,616	0,191	96,807
11	285,0	8,10	91,9	495	0,640	0,311	2,058	95,975	96,615	0,208	96,823
12	229,3	8,10	82,0	453	0,622	0,277	2,245	95,996	96,618	0,204	96,822
13	404,5	8,10	175,3	332	0,653	0,736	0,887	95,962	96,615	0,178	96,793
14	352,7	8,10	180,3	350	0,668	0,753	0,887	95,947	96,615	0,183	96,798
15	221,8	8,10	103,6	350	0,674	0,451	1,494	95,944	96,618	0,153	96,771
16	282,7	8,11	142,8	351	0,661	0,600	1,102	95,954	96,615	0,166	96,781
17	247,7	8,11	112,4	381	0,652	0,465	1,402	95,963	96,615	0,171	96,786
18	268,0	8,11	112,5	400	0,641	0,458	1,400	95,974	96,615	0,175	96,790
19	248,0	8,15	106,0	383	0,639	0,451	1,417	95,976	96,615	0,154	96,769
20	217,7	8,12	82,2	362	0,642	0,361	1,778	95,973	96,615	0,158	96,773
21	250,7	8,12	94,8	412	0,647	0,388	1,668	95,973	96,620	0,162	96,782

$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wf}} = 96,615$ mm; 0%; vůle 0,4 mm

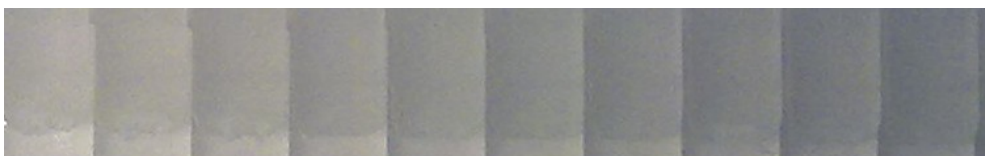
vzorek	F_d [N]	d_c [mm]	E_w [J]	P_m [W]	d_w [mm]	t_w [s]	v_w [mm/s]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]	d_{11} [mm]	d_{wf} [mm]
1	247,3	8,13	100,1	424	0,654	0,389	1,681	95,961	96,615	0,160	96,775
2	232,0	8,12	91,3	406	0,657	0,368	1,785	95,961	96,618	0,168	96,786
3	237,0	8,11	92,1	483	0,654	0,353	1,853	95,968	96,622	0,173	96,795
4	256,3	8,12	97,5	439	0,635	0,367	1,730	95,981	96,616	0,171	96,787
5	242,3	8,12	99,4	423	0,668	0,380	1,758	95,950	96,618	0,163	96,781
6	227,0	8,12	88,3	395	0,645	0,356	1,812	95,970	96,615	0,173	96,788
7	240,3	8,13	101,0	413	0,653	0,385	1,696	95,962	96,615	0,168	96,783
8	238,0	8,13	105,1	451	0,664	0,386	1,720	95,952	96,616	0,164	96,780
9	226,0	8,13	94,7	441	0,641	0,357	1,796	95,977	96,618	0,164	96,782
10	265,7	8,11	109,1	432	0,640	0,402	1,592	95,975	96,615	0,180	96,795
11	230,7	8,11	95,7	434	0,651	0,362	1,798	95,966	96,617	0,175	96,792
12	251,7	8,10	86,6	435	0,644	0,335	1,922	95,971	96,615	0,187	96,802
13	276,0	8,11	82,4	427	0,653	0,323	2,022	95,963	96,616	0,189	96,805
14	261,7	8,11	88,0	452	0,639	0,320	1,997	95,977	96,616	0,181	96,797
15	261,0	8,09	86,1	443	0,636	0,324	1,963	95,980	96,616	0,191	96,807
16	253,7	8,10	90,2	484	0,652	0,319	2,044	95,968	96,620	0,187	96,807
17	212,3	8,11	98,6	388	0,659	0,392	1,681	95,963	96,622	0,157	96,779
18	221,8	8,10	97,7	372	0,639	0,382	1,673	95,981	96,620	0,167	96,787
19	277,0	8,09	91,0	394	0,627	0,365	1,718	95,988	96,615	0,162	96,777
20	237,0	8,09	89,7	380	0,644	0,371	1,736	95,975	96,619	0,180	96,799
21	276,0	8,11	99,0	401	0,668	0,388	1,722	95,947	96,615	0,176	96,791

Příloha 12 - Zobrazení kontaktní plochy tělíska 1 se sonotrodou

Změna stupně brzdění

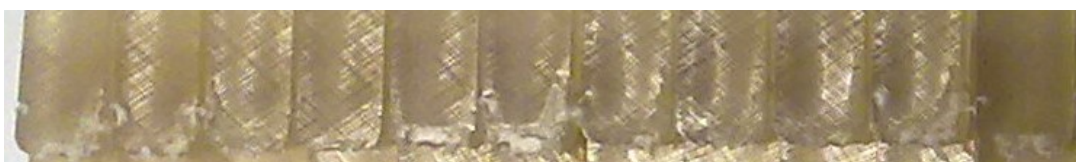
$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

0%

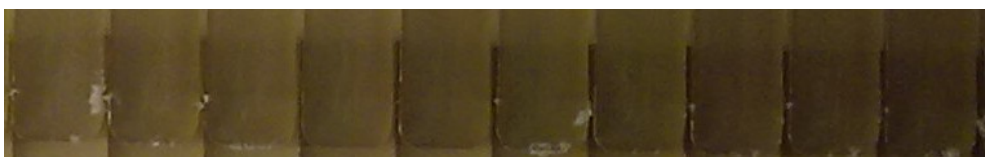


21

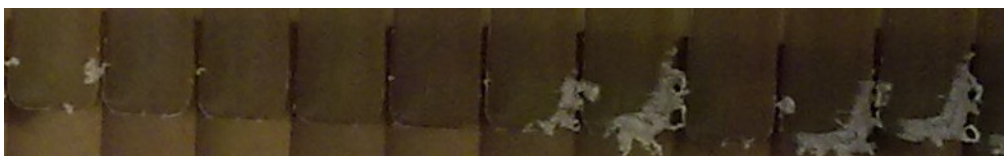
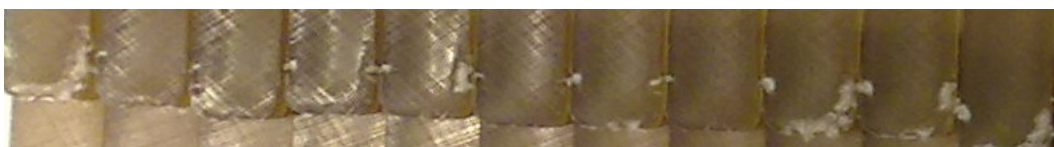
2%



4%

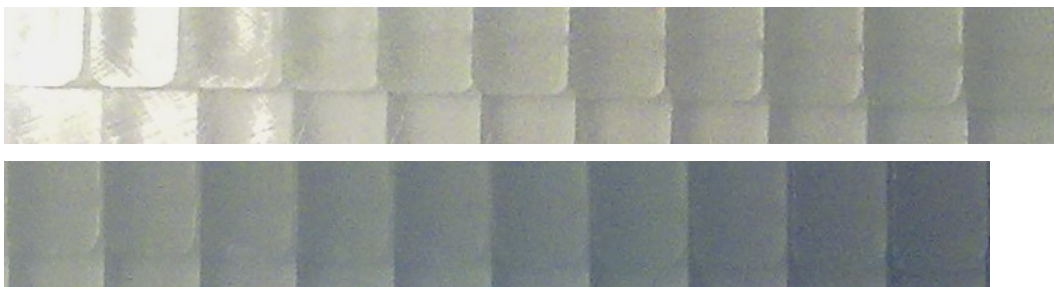


6%

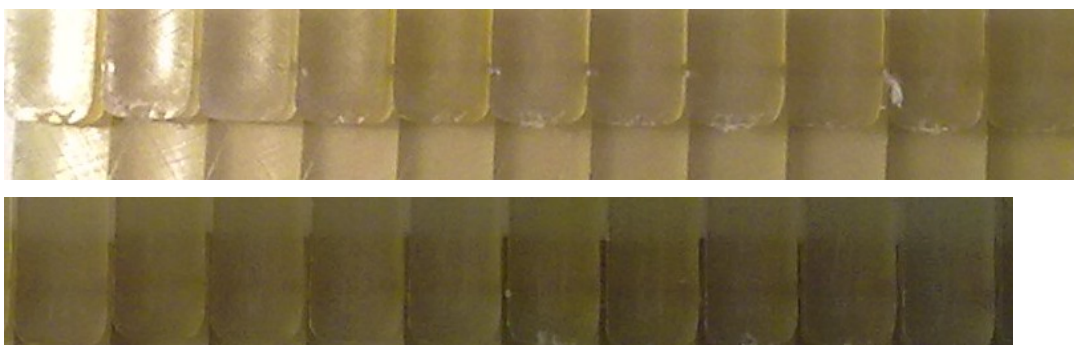


$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$

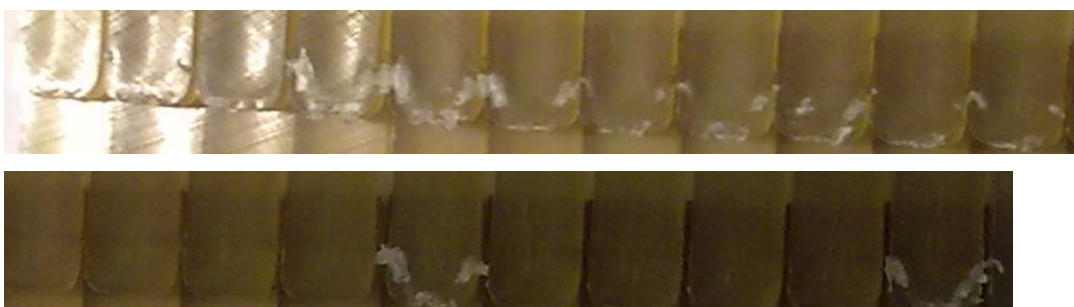
0%



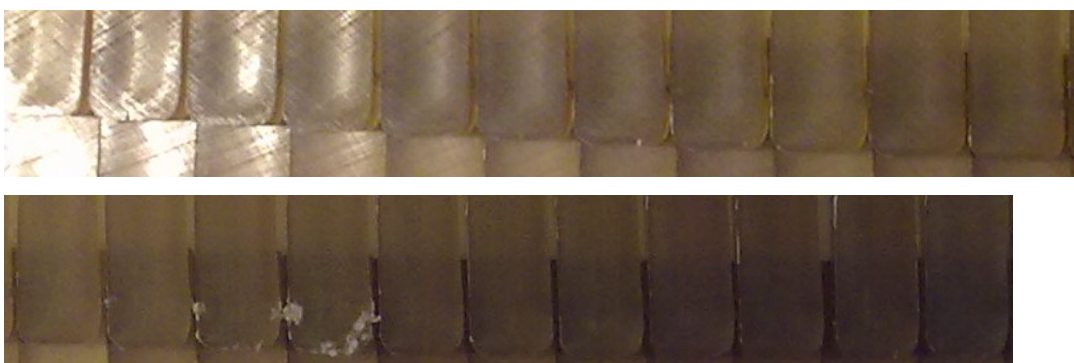
2%



4%

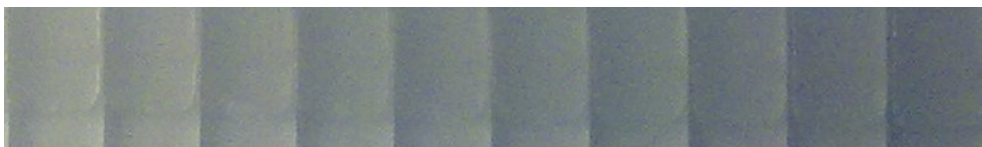


6%



$K = 9$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

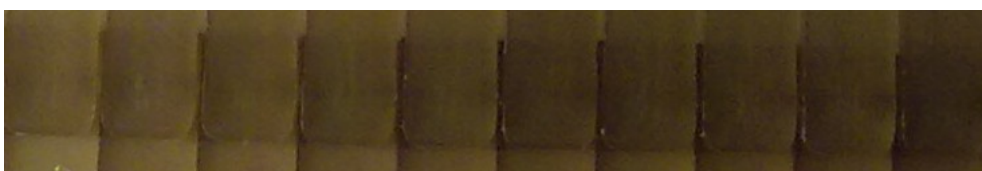
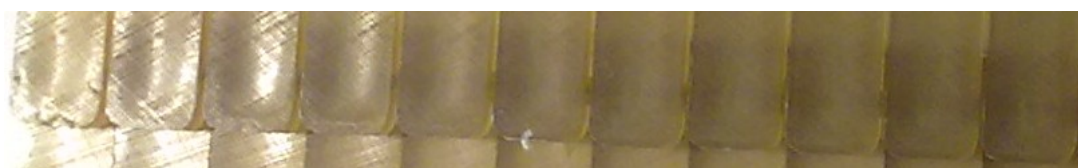
0%



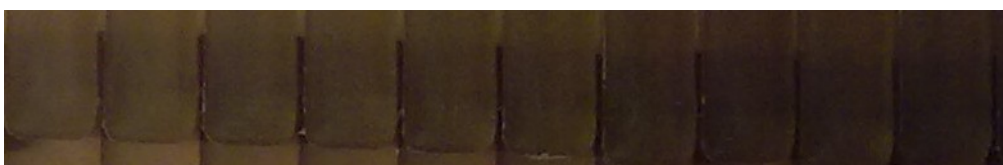
2%



4%

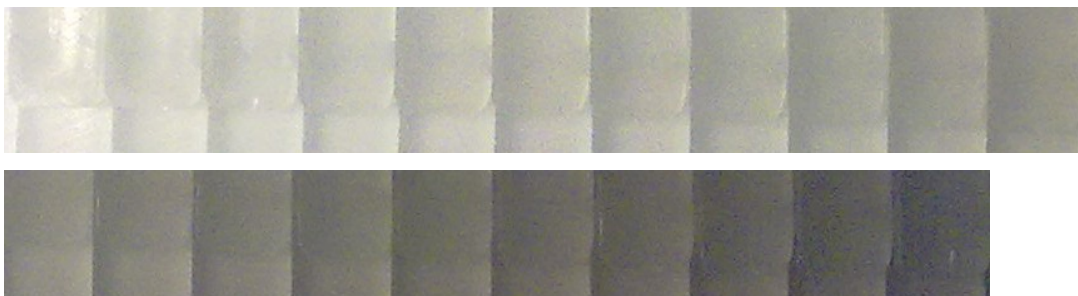


6%

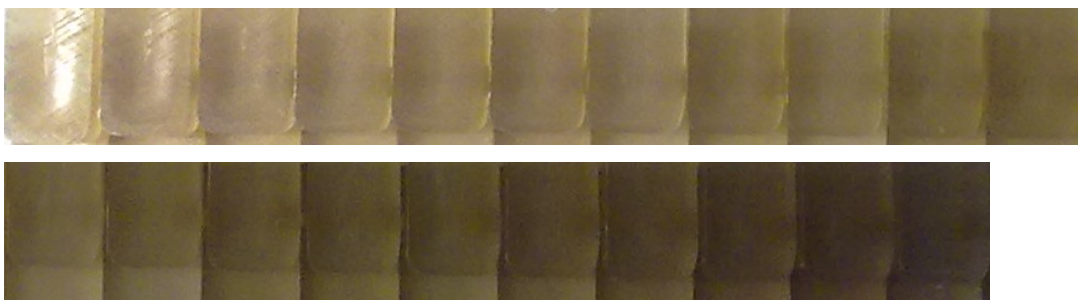


$K = 12 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$

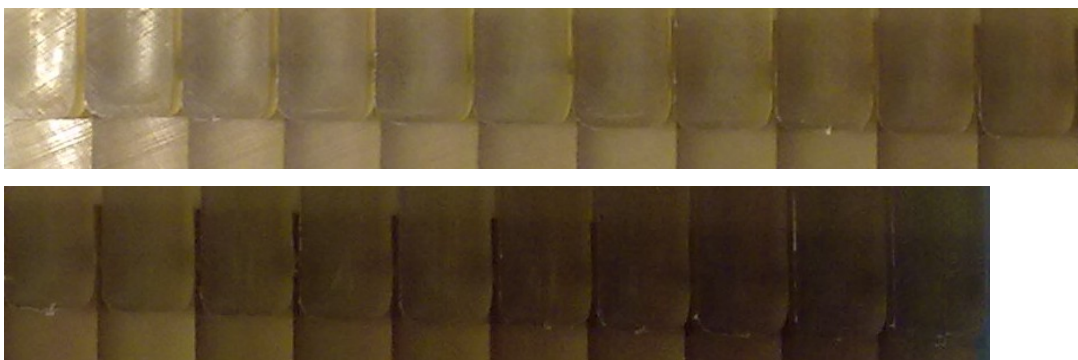
0%



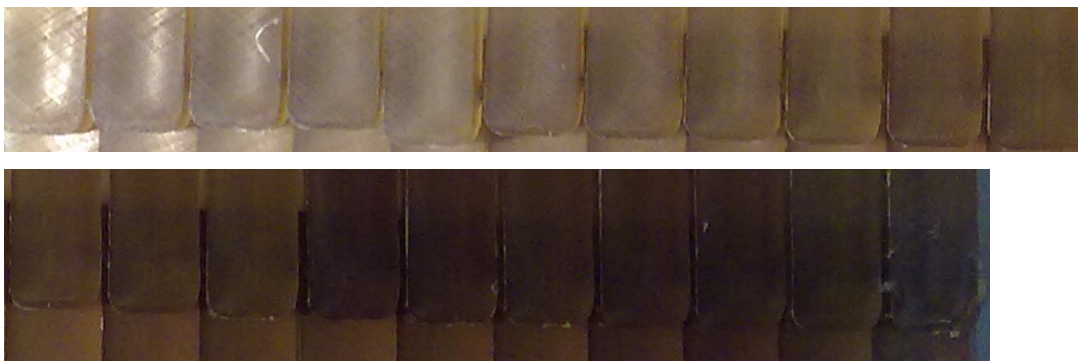
2%



4%

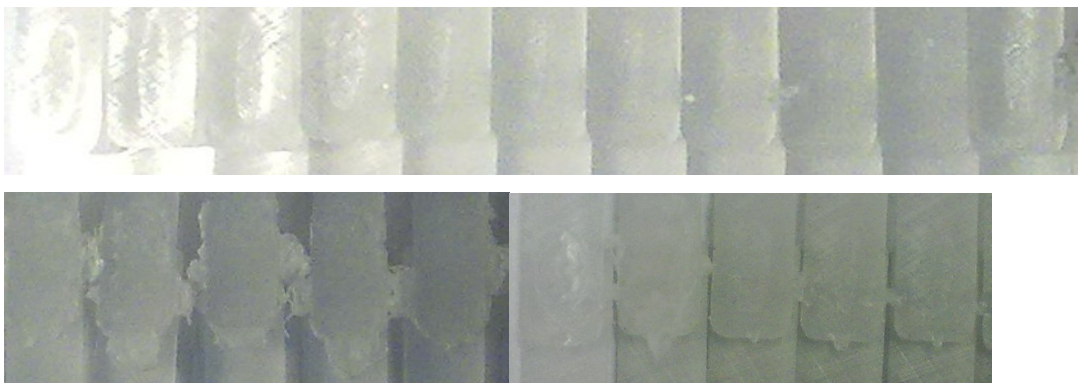


6%

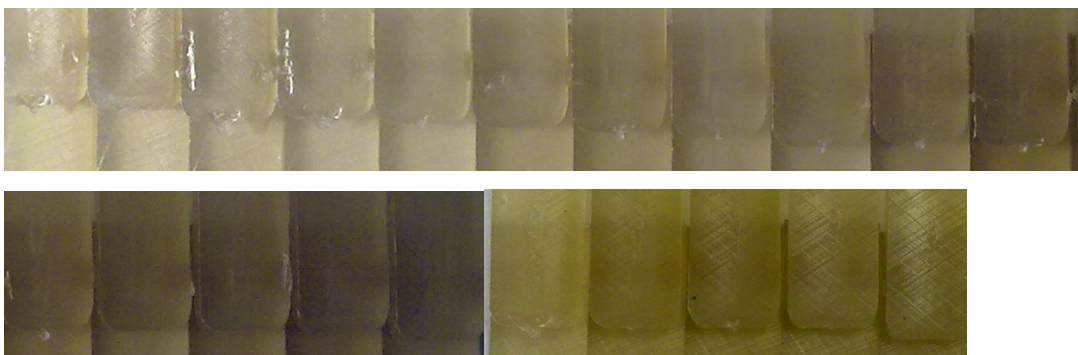


$K = 15 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$

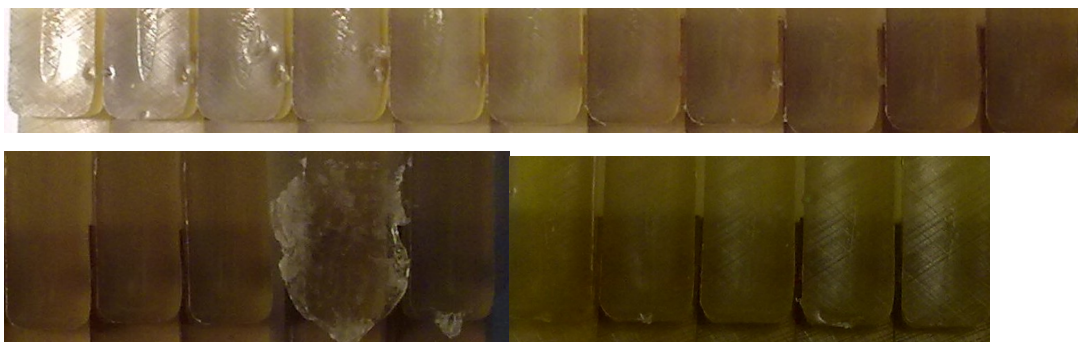
0%



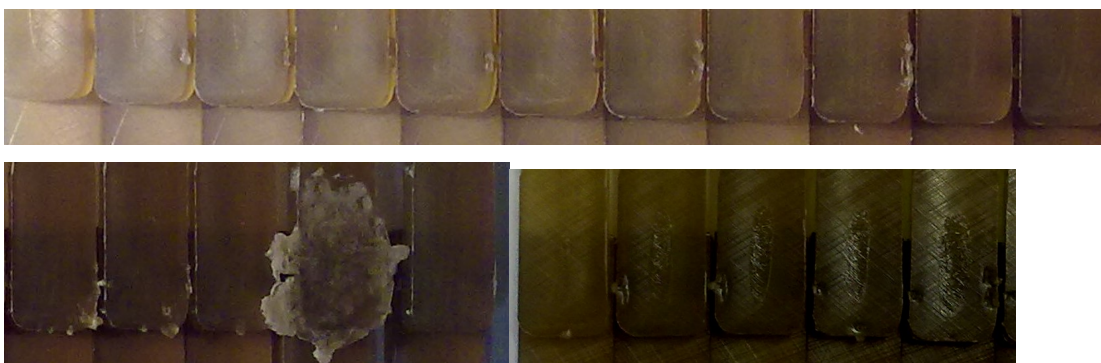
2%



4%



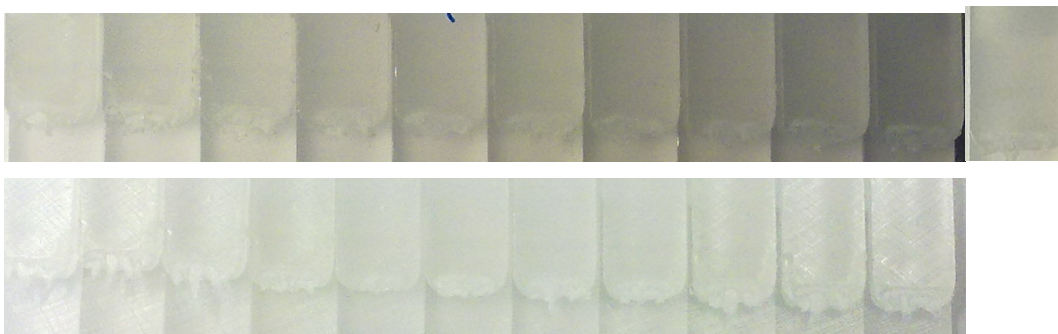
6%



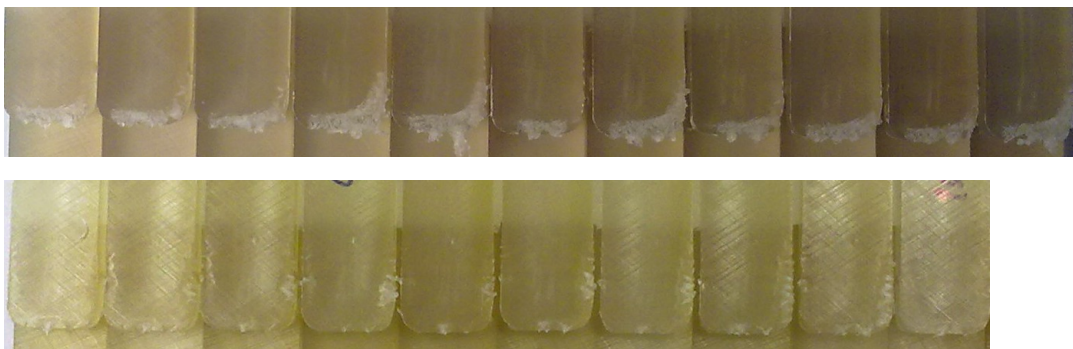
Změna svařovacího tlaku

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

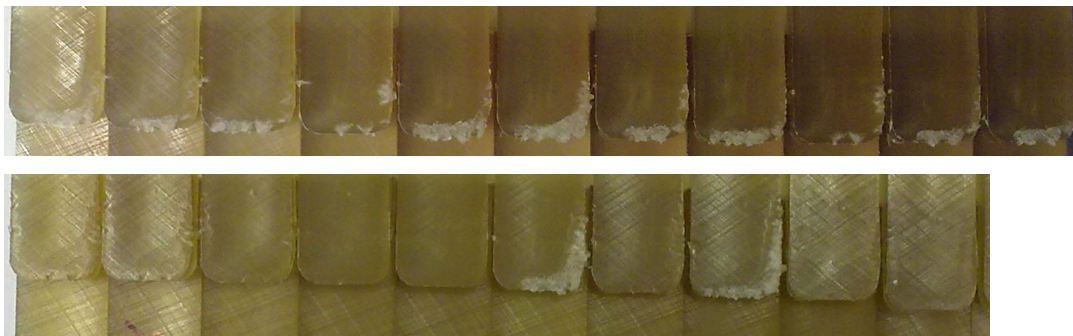
0%



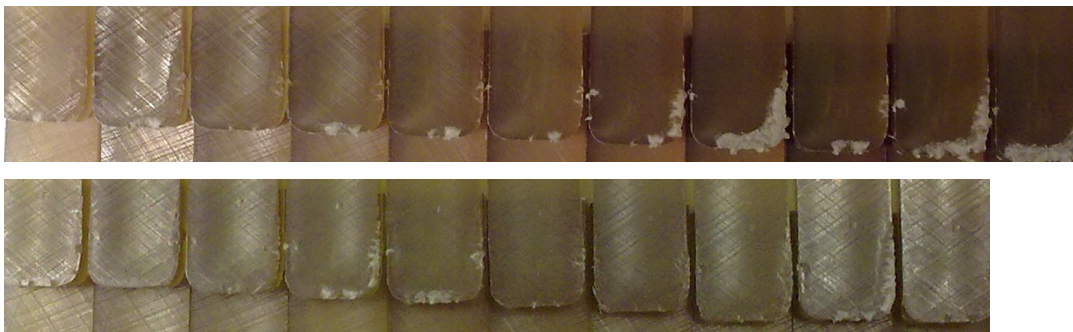
2%



4%

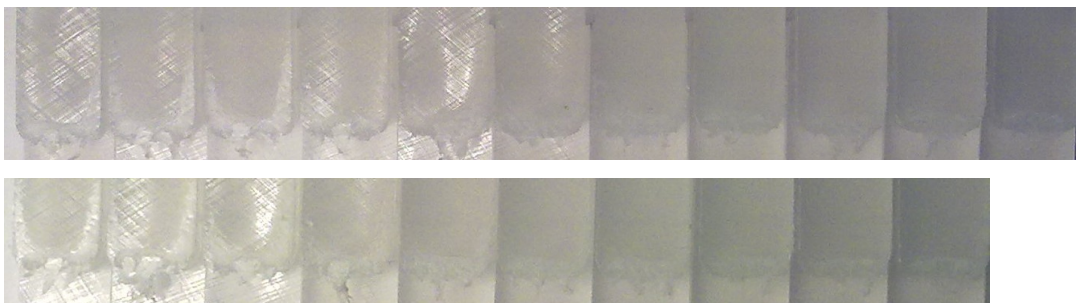


6%

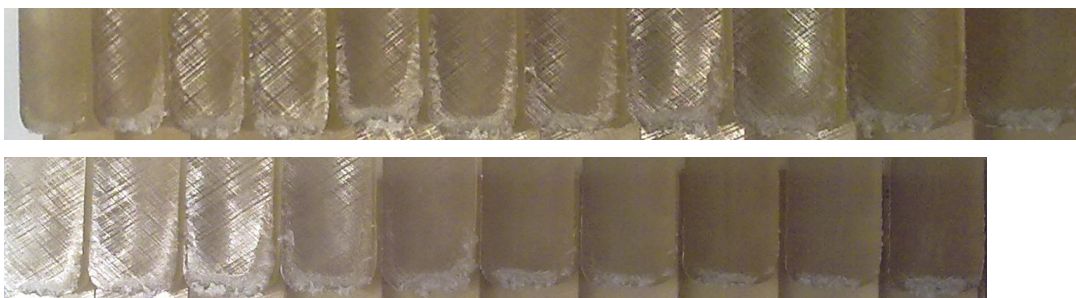


$K = 3$ [1]; $p_w = 100$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

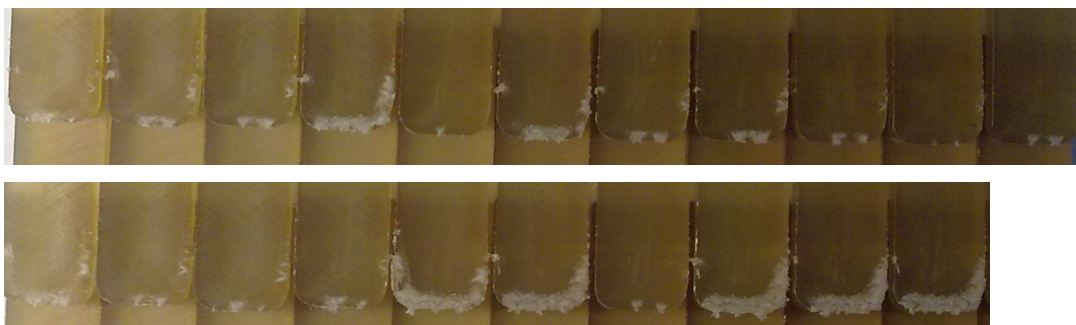
0%



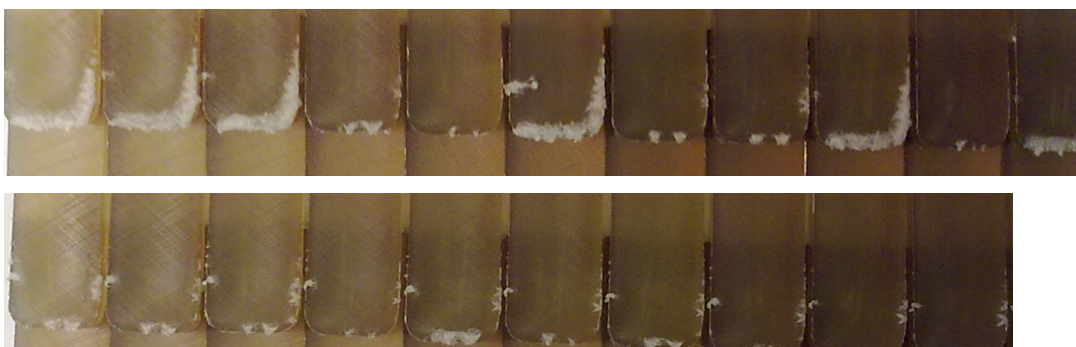
2%



4%

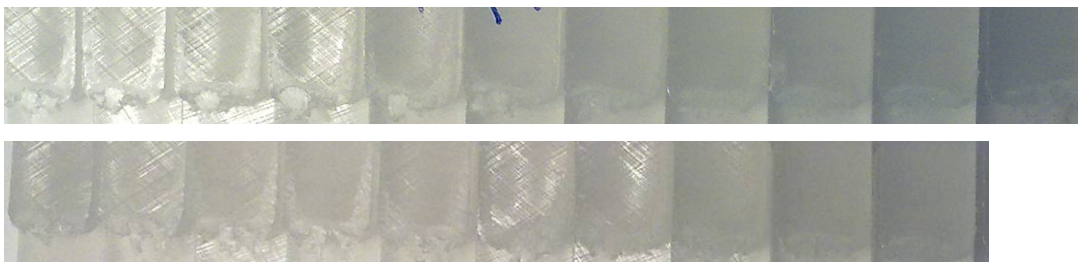


6%

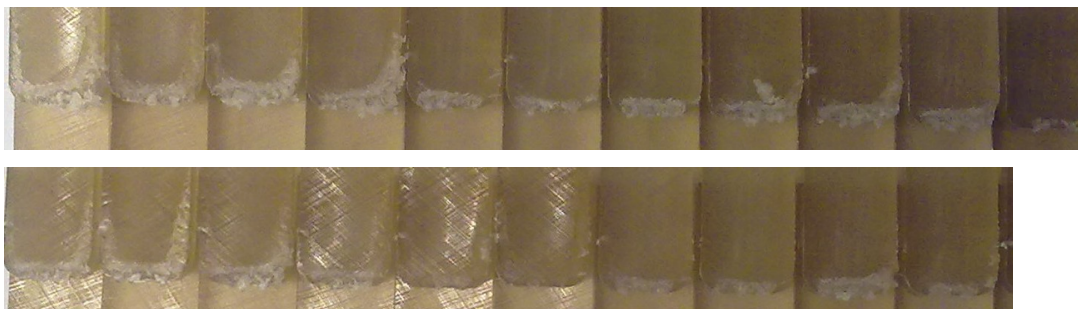


$K = 3$ [1]; $p_w = 300$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

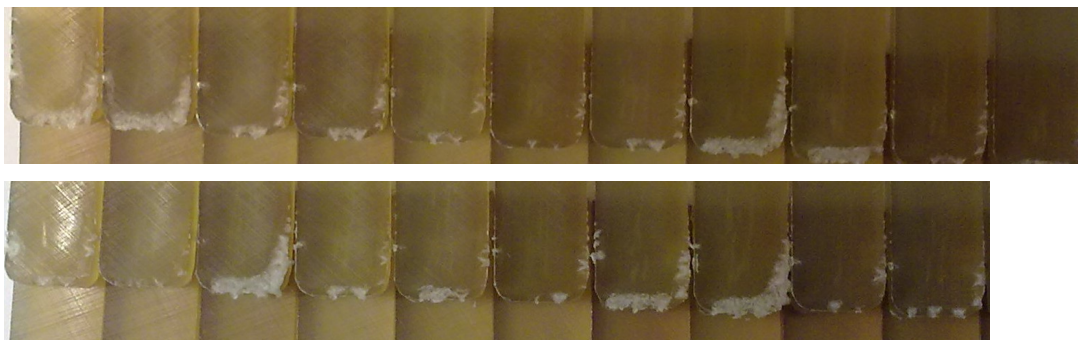
0%



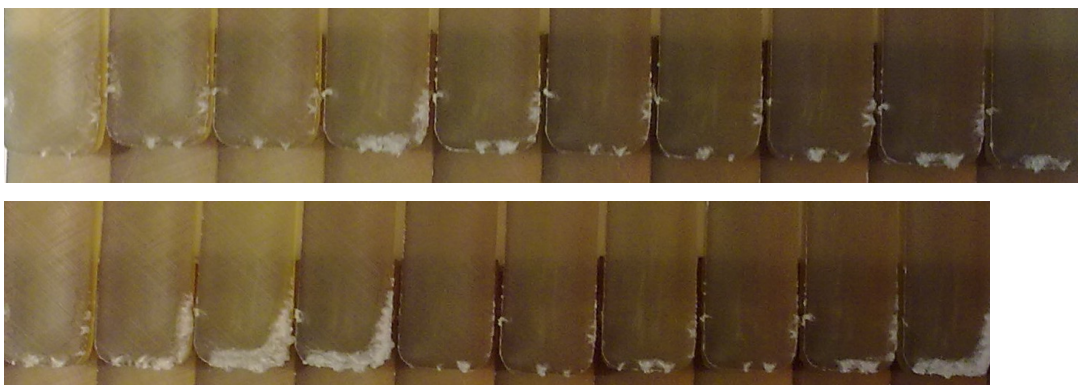
2%



4%

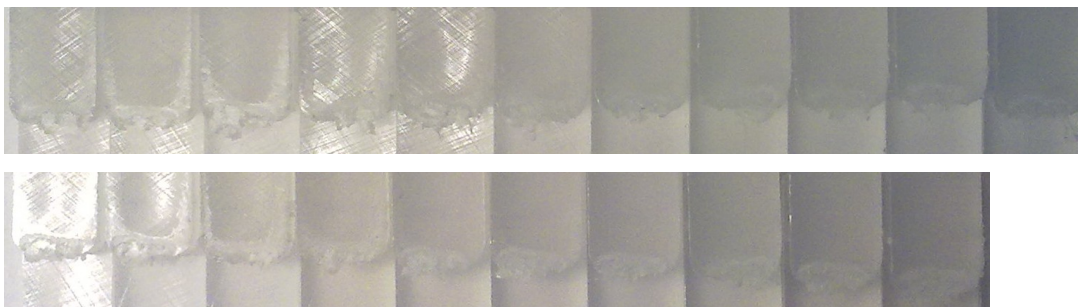


6%

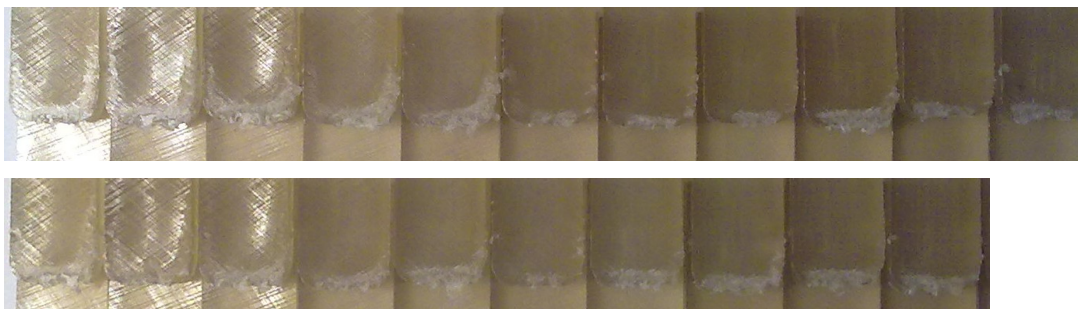


$K = 3 [1]$; $p_w = 600 \text{ kPa}$; $A_w = 100 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$

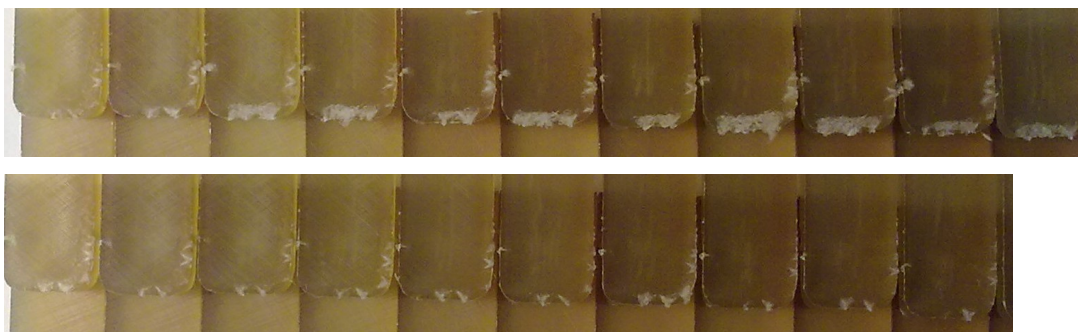
0%



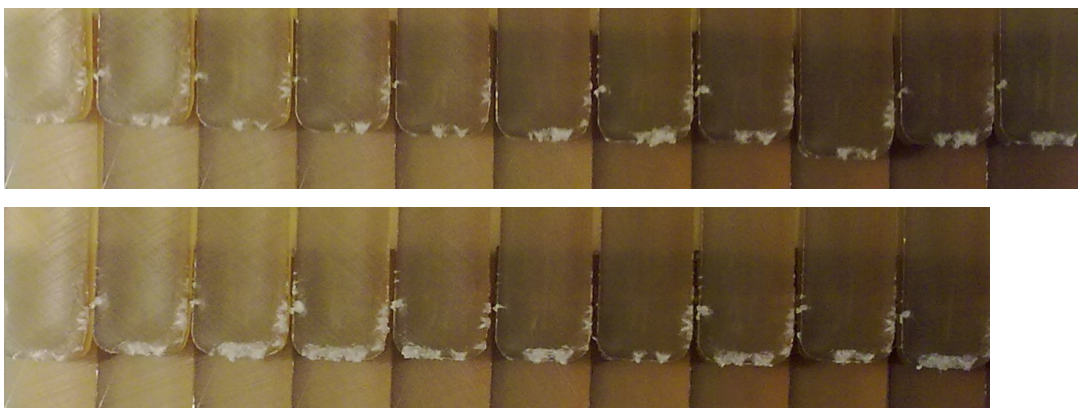
2%



4%



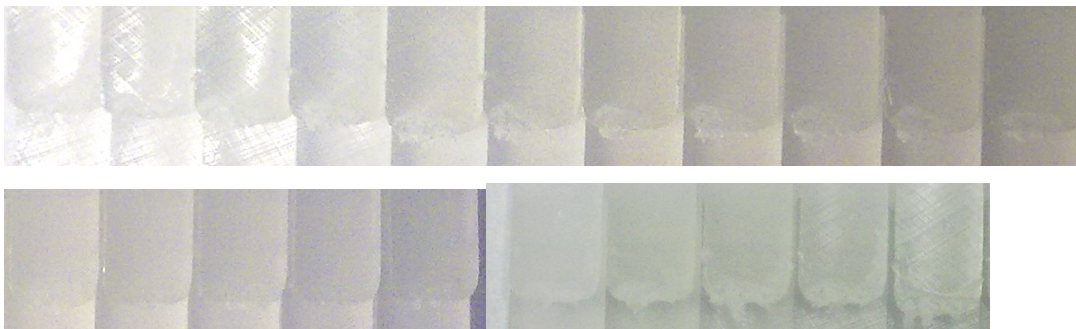
6%



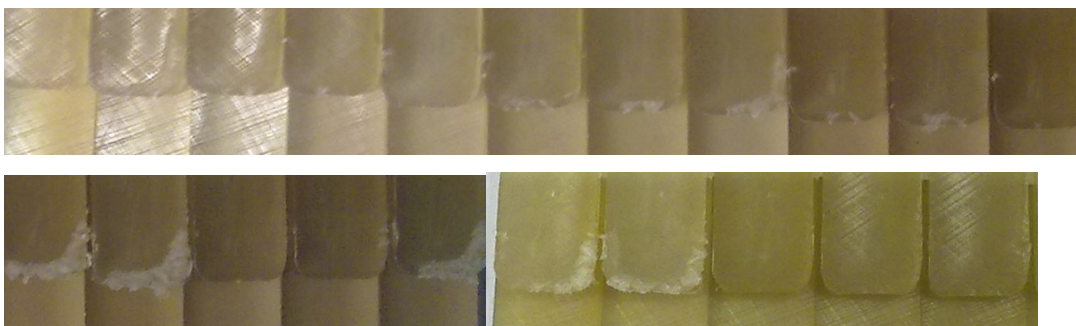
Změna amplitudy

$K = 3$ [1]; $p_w = 50$ kPa; $A_w = 70$ μm ; $d_{\text{wft}} = 96,615$ mm

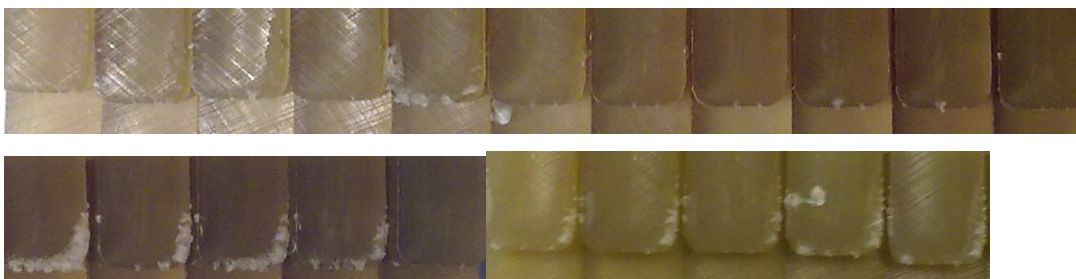
0%



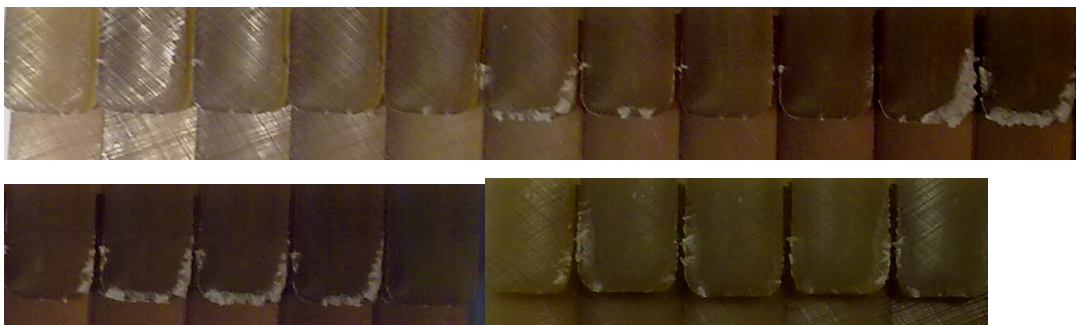
2%



4%

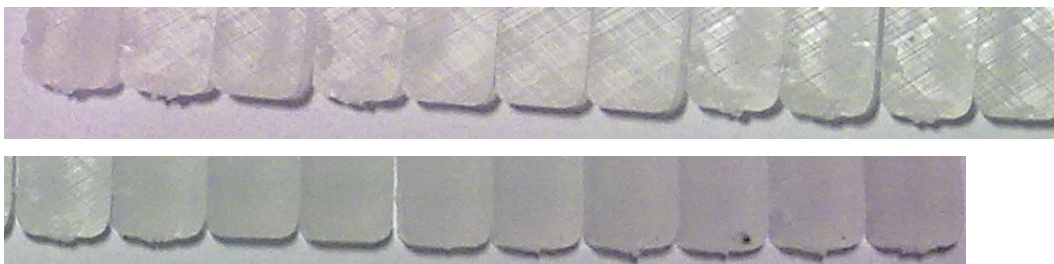


6%

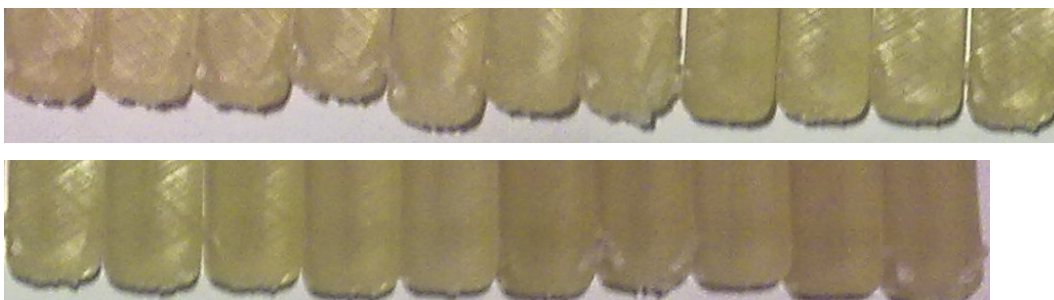


$K = 6 [1]$; $p_w = 15 \text{ kPa}$; $A_w = 70 \text{ } \mu\text{m}$; $d_{wft} = 96,615 \text{ mm}$

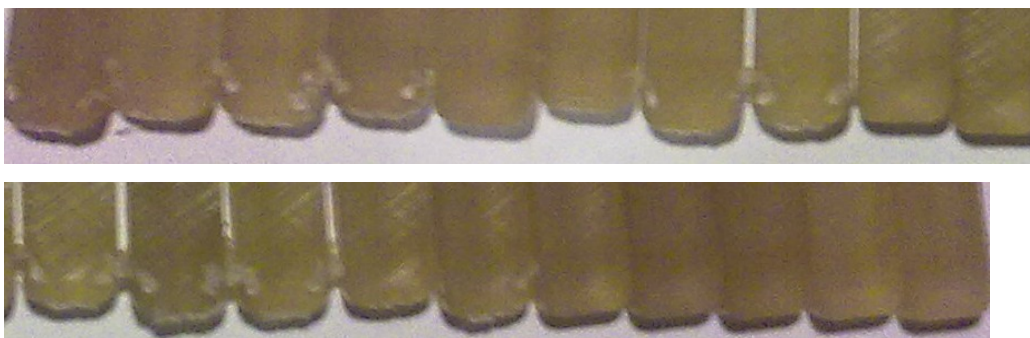
0%



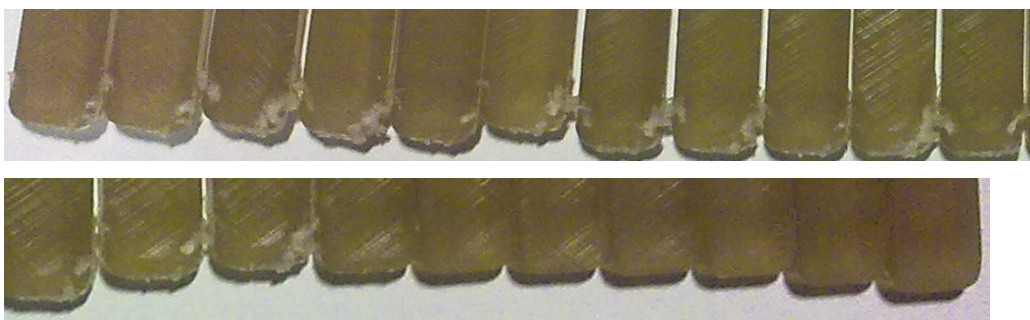
2%



4%



6%

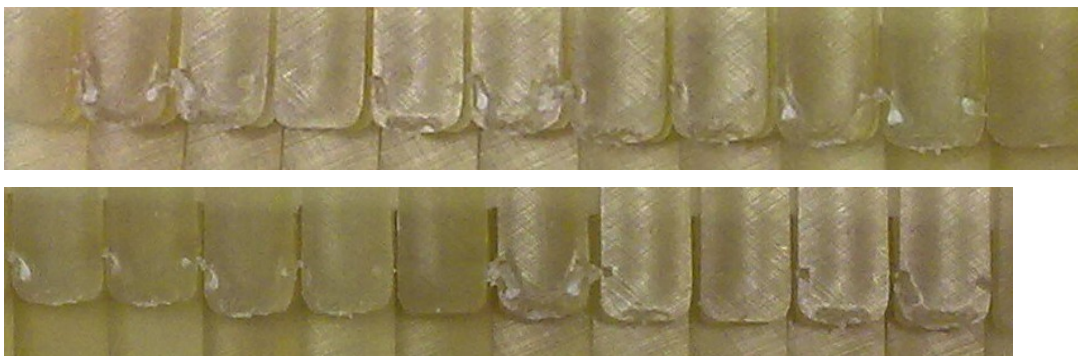


$K = 9 [1]$, $p_w = 15 \text{ kPa}$, $A_w = 70 \text{ } \mu\text{m}$, $d_{\text{wft}} = 96,615 \text{ mm}$

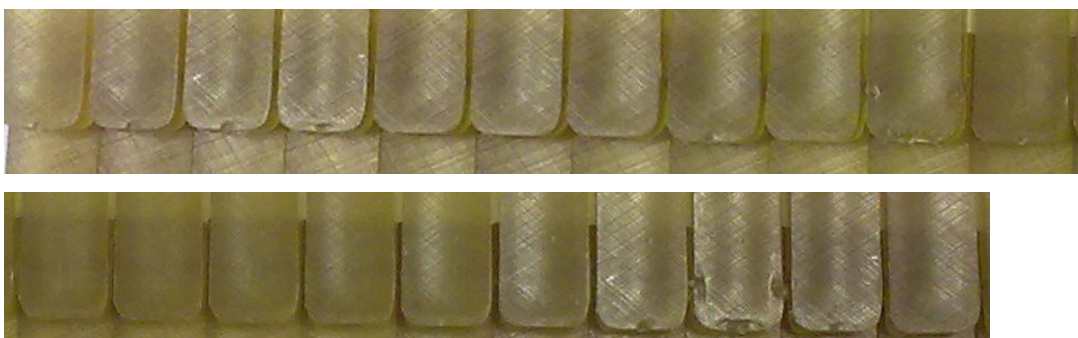
0 %



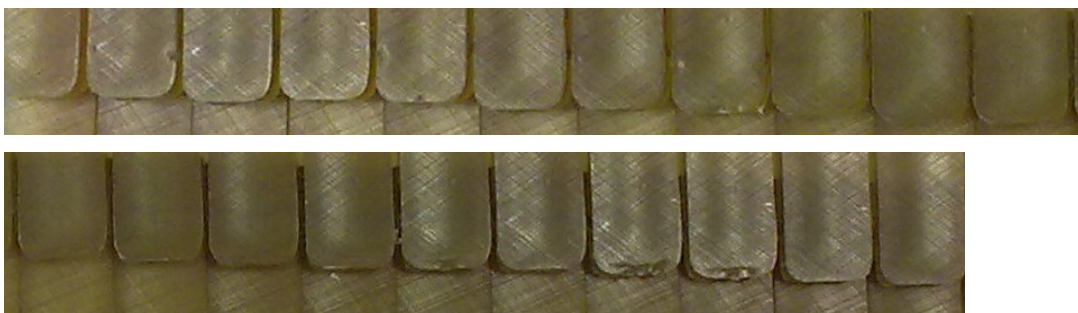
2 %



4 %



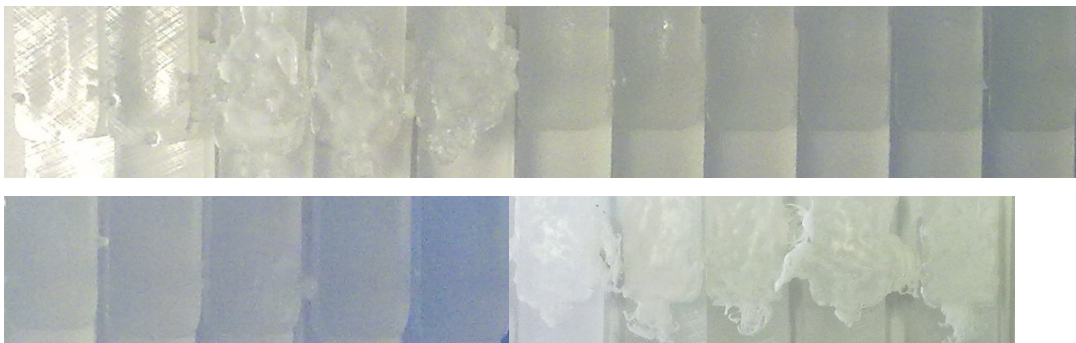
6 %



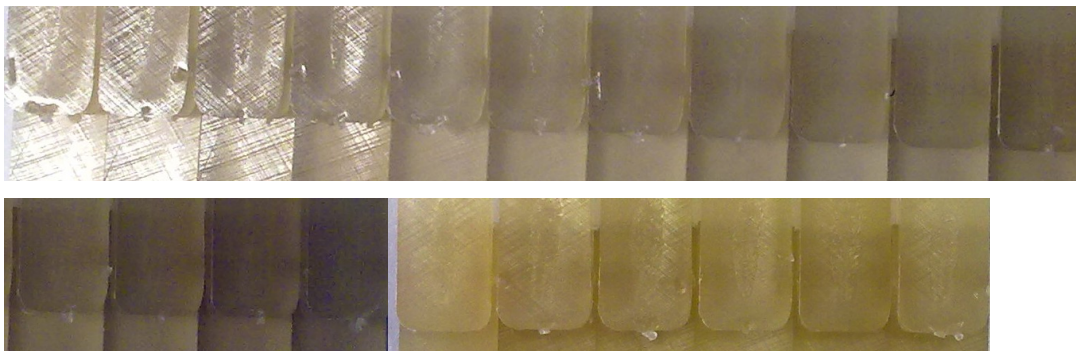
Vyšší K a p_w

$K = 20$ [1]; $p_w = 60$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{wft} = 96,615$ mm

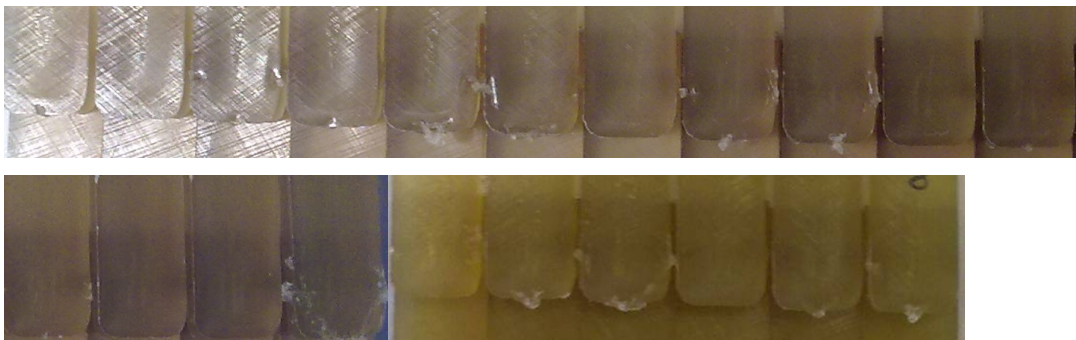
0%



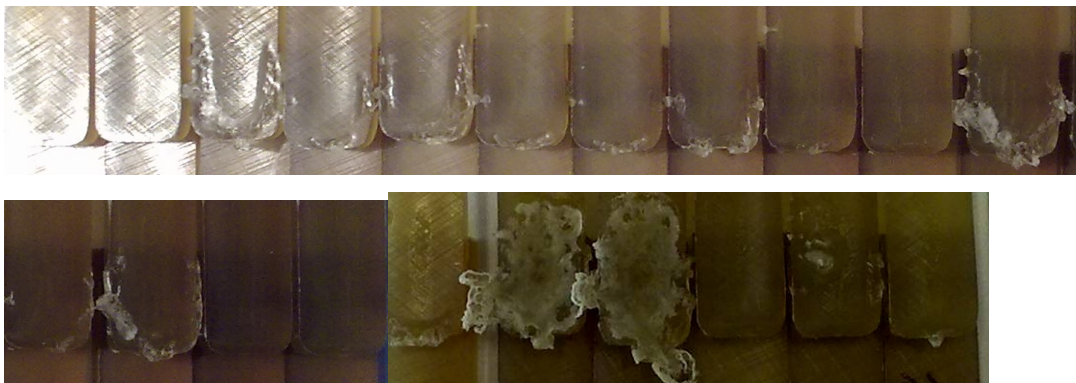
2%



4%



6%





Krátké tělísko 1

$K = 3$ [1]; $p_w = 15$ kPa; $A_w = 100$ μm ; $d_{wft} = 96,615$ mm

